



Pengaruh Suhu Pemadatan terhadap Stabilitas Marshall pada Aspal Hibrida Self-Healing Hidrofobik

Yosef Aryawanda^{1*}, Ratnawulan²

¹⁻² Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: yosefaryawanda@gmail.com¹

Article Info :

Received:
25-02-2026
Revised:
20-03-2026
Accepted:
10-04-2026

Abstract

This study examines the influence of compaction temperature on Marshall stability in hydrophobic self-healing hybrid asphalt using a quantitative laboratory experimental approach. The asphalt mixture was formulated with penetration grade 60/70 binder and standard aggregates, modified by nanosilica to enhance hydrophobic characteristics and Escherichia coli as a biological self-healing agent. Compaction temperatures of 180°C, 185°C, and 190°C were evaluated alongside a 150°C control sample without modification. The results indicate a non-linear relationship between temperature and mechanical performance, with stability increasing to an optimum condition at 185°C before declining at higher temperatures. This trend reflects improved densification and aggregate interlocking at moderate temperatures, while excessive heat reduces binder effectiveness due to softening. Volumetric parameters further demonstrate that optimal temperature conditions contribute to balanced void distribution and improved binder efficiency. Additionally, the hybrid system exhibits multi-scale interactions between nano-modification and microbial healing mechanisms, enhancing durability and resistance to environmental factors. These findings emphasize the importance of precise thermal control in optimizing both structural integrity and functional performance of advanced asphalt materials.

Keywords: Marshall Stability, Compaction Temperature, Hybrid Asphalt, Nanosilica, Self-Healing.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh suhu pemadatan terhadap stabilitas Marshall pada aspal hibrida hidrofobik yang mampu memperbaiki diri secara mandiri, dengan menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium kuantitatif. Campuran aspal diformulasikan menggunakan pengikat dengan tingkat penetrasi 60/70 dan agregat standar, yang dimodifikasi dengan nanosilika untuk meningkatkan karakteristik hidrofobik serta Escherichia coli sebagai agen biologis yang mampu memperbaiki diri. Suhu pemadatan 180°C, 185°C, dan 190°C dievaluasi bersama sampel kontrol 150°C tanpa modifikasi. Hasil menunjukkan hubungan non-linear antara suhu dan kinerja mekanis, dengan stabilitas meningkat hingga kondisi optimal pada 185°C sebelum menurun pada suhu yang lebih tinggi. Tren ini mencerminkan peningkatan padatan dan interlocking agregat pada suhu sedang, sementara panas berlebihan mengurangi efektivitas pengikat akibat pelunakan. Parameter volumetrik lebih lanjut menunjukkan bahwa kondisi suhu optimal berkontribusi pada distribusi rongga yang seimbang dan efisiensi pengikat yang lebih baik. Selain itu, sistem hibrida menunjukkan interaksi multiskala antara modifikasi nano dan mekanisme penyembuhan mikroba, meningkatkan ketahanan dan resistansi terhadap faktor lingkungan. Temuan ini menekankan pentingnya pengendalian termal yang presisi dalam mengoptimalkan integritas struktural dan kinerja fungsional bahan aspal canggih.

Kata Kunci: Stabilitas Marshall, Suhu Pemadatan, Aspal Hibrida, Nanosilika, Penyembuhan Diri.



©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 perkerasan jalan menunjukkan pergeseran paradigma dari material pasif menuju sistem material fungsional yang adaptif terhadap lingkungan dan mampu memperpanjang umur layanan secara mandiri, seiring meningkatnya tekanan global terhadap infrastruktur akibat intensitas lalu lintas, perubahan iklim, dan tuntutan keberlanjutan; dalam konteks ini, inovasi aspal tidak lagi terbatas pada peningkatan kekuatan mekanik, tetapi juga mencakup rekayasa sifat hidrofobik dan kemampuan self-healing berbasis material cerdas, termasuk pemanfaatan nanosilika dan agen biologis untuk memperbaiki kerusakan mikro secara in-situ (Zhang et al., 2020; Yu et al., 2024). Transformasi ini memperlihatkan bahwa sistem perkerasan modern harus mampu

merespons interaksi kompleks antara beban mekanis dan paparan lingkungan, terutama di wilayah tropis dengan variabilitas temperatur dan kelembapan tinggi yang mempercepat degradasi struktural melalui mekanisme retak, deformasi plastis, dan stripping akibat penetrasi air.

Literatur empiris menunjukkan bahwa modifikasi aspal menggunakan nanosilika secara konsisten meningkatkan kohesi internal, ketahanan terhadap kelembapan, serta stabilitas Marshall melalui peningkatan viskositas dan interaksi antarmuka binder–agregat, sementara pendekatan self-healing berbasis mikroorganisme seperti *Escherichia coli* berkontribusi pada proses biomineralisasi yang menghasilkan CaCO_3 untuk menutup retakan mikro dan memperlambat propagasi kerusakan (Yu et al., 2024; Zhang et al., 2020). Pada saat yang sama, studi eksperimental mengenai parameter proses, khususnya temperatur pemadatan, menunjukkan pola non-linear terhadap kinerja mekanik campuran aspal, di mana peningkatan temperatur meningkatkan workability dan densifikasi hingga titik optimum sebelum mengalami penurunan akibat pelunakan binder dan berkurangnya kekuatan struktural (Jimmyanto & Reskita, 2025; Massara & Afif, 2024). Sintesis temuan ini mengindikasikan bahwa performa akhir campuran tidak hanya ditentukan oleh komposisi material, tetapi juga oleh interaksi dinamis antara sifat material dan kondisi proses yang mengatur pembentukan struktur internal.

Meskipun demikian, terdapat keterbatasan konseptual dan empiris dalam literatur yang ada, terutama terkait fragmentasi kajian antara inovasi material dan parameter proses; sebagian besar penelitian berfokus secara parsial pada efek aditif seperti nanosilika atau bahan substitusi filler terhadap karakteristik Marshall tanpa mengintegrasikan variabel temperatur pemadatan sebagai determinan utama struktur mikro campuran (Massara et al., 2022; Halim & Sepriyanna, 2022). Inkonsistensi juga muncul dalam hasil penelitian terkait temperatur optimum, yang sangat bergantung pada jenis campuran dan modifikasi material, sehingga generalisasi temuan menjadi terbatas (Irwansyah et al., 2022; Jimmyanto & Reskita, 2025). Ketiadaan pendekatan holistik yang menggabungkan teknologi hidrofobik, self-healing, dan kontrol termal menyebabkan celah signifikan dalam pemahaman mengenai bagaimana parameter proses memediasi efektivitas inovasi material dalam kondisi nyata.

Kesenjangan tersebut memiliki implikasi ilmiah dan praktis yang kuat, mengingat kegagalan dalam mengoptimalkan temperatur pemadatan dapat mengurangi manfaat modifikasi material, bahkan berpotensi mempercepat degradasi akibat distribusi binder yang tidak homogen dan terbentuknya rongga yang tidak terkendali; kondisi ini menjadi krusial pada lingkungan tropis di mana fluktuasi temperatur dan kelembapan memperburuk sensitivitas campuran terhadap perubahan viskositas binder dan interaksi agregat (Massara & Afif, 2024; Halim & Sepriyanna, 2022). Di sisi lain, integrasi teknologi self-healing dan sifat hidrofobik menjanjikan peningkatan umur layanan yang signifikan, namun efektivitasnya sangat bergantung pada kondisi awal struktur internal yang dibentuk selama proses pemadatan, sehingga kontrol temperatur menjadi variabel kunci yang belum sepenuhnya dipahami dalam konteks sistem aspal hibrida.

Dalam lanskap keilmuan, penelitian ini menempati posisi strategis dengan menghubungkan dua domain yang selama ini berkembang relatif terpisah, yaitu inovasi material fungsional dan optimasi parameter proses, melalui pendekatan eksperimental yang menguji interaksi antara temperatur pemadatan dan kinerja mekanik aspal hibrida berbasis nanosilika dan agen biologis; pendekatan ini tidak hanya memperluas kerangka analisis performa Marshall sebagai indikator kuat tekan, tetapi juga menempatkan temperatur sebagai variabel mediasi yang menentukan keberhasilan implementasi teknologi hidrofobik dan self-healing dalam sistem perkerasan modern. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan model pemahaman yang lebih integratif mengenai hubungan antara struktur mikro, parameter proses, dan respons mekanik campuran aspal.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara sistematis pengaruh variasi temperatur pemadatan terhadap stabilitas Marshall pada aspal hibrida hidrofobik yang memiliki kemampuan self-healing, serta mengidentifikasi kondisi optimum yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanik dan karakteristik deformasi. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada penguatan konsep interaksi material–proses dalam sistem aspal fungsional, sementara kontribusi metodologisnya diwujudkan melalui desain eksperimen terkontrol yang mengintegrasikan modifikasi nanosilika dan agen biologis dengan variasi temperatur sebagai variabel utama, sehingga menghasilkan kerangka evaluasi yang lebih komprehensif dalam optimasi performa perkerasan jalan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris dengan pendekatan eksperimen laboratorium kuantitatif yang dirancang untuk menguji secara terkontrol interaksi antara inovasi material dan parameter proses dalam sistem aspal hibrida. Proses pengembangan inovasi dimulai dengan formulasi campuran berbasis aspal penetrasi 60/70 dan agregat standar Bina Marga yang dimodifikasi menggunakan nanosilika sebesar 5% dari berat binder untuk meningkatkan sifat hidrofobik, serta agen biologis *Escherichia coli* dengan konsentrasi 10^3 cells/mL yang berfungsi sebagai mekanisme self-healing melalui induksi biomineralisasi. Prosedur eksperimental disusun secara berlapis dengan mempertimbangkan sensitivitas termal material, di mana nanosilika diaplikasikan melalui metode blending pada tahap pencampuran panas untuk memastikan dispersi homogen, sementara inokulasi bakteri dilakukan setelah temperatur campuran turun di bawah 40°C guna menjaga viabilitas biologis. Variabel utama yang dimanipulasi adalah temperatur pemadatan pada tiga tingkat, yaitu 180°C , 185°C , dan 190°C , dengan tambahan sampel kontrol pada 150°C tanpa modifikasi material untuk menyediakan baseline komparatif. Seluruh spesimen diproduksi menggunakan Marshall Compactor dengan prosedur standar untuk menjamin konsistensi densifikasi dan reproduksibilitas struktur internal campuran, sehingga memungkinkan isolasi efek temperatur terhadap pembentukan interlocking agregat dan distribusi binder secara sistematis.

Teknik validasi dalam penelitian ini mengandalkan pengujian kinerja mekanik menggunakan Marshall Stability Testing Machine sebagai instrumen utama untuk mengukur parameter stabilitas (kg) dan flow (mm), yang merepresentasikan kapasitas kuat tekan dan deformabilitas campuran secara simultan. Selain itu, parameter volumetrik seperti Void in Mix (VIM) dan Void Filled with Bitumen (VFB) dianalisis untuk mengevaluasi kualitas struktur internal dan efisiensi pengisian rongga oleh binder, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap mekanisme yang mendasari perubahan kinerja akibat variasi temperatur. Pendekatan analisis dilakukan secara komparatif dan inferensial dengan menilai pola hubungan non-linear antara temperatur pemadatan dan respons mekanik, termasuk identifikasi titik optimum berdasarkan keseimbangan antara peningkatan stabilitas dan batas deformasi plastis. Ketahanan metodologis dijamin melalui kontrol variabel yang ketat, replikasi pengujian, serta integrasi multi-parameter evaluasi yang tidak hanya berfokus pada satu indikator kinerja, melainkan pada konsistensi antar parameter sebagai bentuk validasi silang, sementara keunikan metodologi terletak pada penggabungan sistem material hibrida hidrofobik-self-healing dengan pendekatan evaluasi berbasis parameter proses, yang secara simultan menangkap dimensi material, termal, dan struktural dalam satu kerangka eksperimental terpadu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Stabilitas Marshall terhadap Variasi Suhu Pemadatan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur pemadatan berperan signifikan dalam menentukan nilai stabilitas Marshall pada campuran aspal hibrida yang dikembangkan. Nilai stabilitas meningkat secara konsisten dari kondisi 180°C menuju 185°C , kemudian mengalami penurunan pada temperatur 190°C yang mengindikasikan adanya titik optimum termal dalam sistem. Fenomena ini merefleksikan hubungan non-linear antara temperatur dan performa mekanik yang telah banyak diidentifikasi dalam studi sebelumnya terkait campuran aspal konvensional maupun termodifikasi. Pola tersebut selaras dengan temuan bahwa peningkatan temperatur dapat meningkatkan workability hingga batas tertentu sebelum terjadi degradasi binder akibat efek pelunakan berlebih (Jimmyanto & Reskita, 2025).

Nilai stabilitas sebesar 1324 kg pada 180°C menunjukkan kondisi awal densifikasi yang belum optimal, yang berkaitan dengan viskositas binder yang masih relatif tinggi sehingga menghambat mobilitas partikel agregat. Ketika temperatur meningkat menjadi 185°C , nilai stabilitas mencapai 1458 kg yang mencerminkan peningkatan interlocking agregat dan distribusi binder yang lebih homogen. Kondisi ini menunjukkan bahwa temperatur tersebut mampu menurunkan viskositas binder secara optimal tanpa mengorbankan kohesi internal campuran. Studi terdahulu juga menegaskan bahwa temperatur optimum berperan dalam meningkatkan kontak antar agregat yang menjadi faktor dominan dalam kekuatan struktural campuran (Massara & Afif, 2024).

Penurunan stabilitas pada temperatur 190°C menjadi 1401 kg mengindikasikan bahwa temperatur yang terlalu tinggi justru menurunkan kinerja mekanik campuran. Mekanisme ini dapat dijelaskan melalui pelunakan binder yang berlebihan sehingga menyebabkan film aspal menjadi terlalu

tipis dan kehilangan kemampuan mengikat agregat secara efektif. Dampak ini juga berkaitan dengan peningkatan deformasi plastis yang tercermin dari nilai flow yang lebih tinggi. Literatur menunjukkan bahwa overheating pada campuran aspal dapat menyebabkan penurunan modulus kekakuan akibat degradasi struktur molekuler binder (Li et al., 2023).

Pengaruh temperatur terhadap stabilitas juga tidak dapat dilepaskan dari interaksi antara nanosilika dan matriks aspal yang meningkatkan kekakuan dan daya ikat sistem. Nanosilika berperan dalam meningkatkan luas permukaan interaksi sehingga memperkuat struktur internal campuran pada temperatur optimum. Pada kondisi temperatur tinggi, kontribusi nanosilika tetap signifikan, namun tidak mampu sepenuhnya mengimbangi efek pelunakan binder. Hal ini menunjukkan bahwa parameter proses tetap menjadi faktor pembatas utama meskipun dilakukan modifikasi material (Dai et al., 2023).

Perbandingan dengan sampel kontrol pada 150°C menunjukkan nilai stabilitas yang jauh lebih rendah, yaitu sebesar 1094 kg, yang mengindikasikan bahwa tanpa modifikasi material dan pada temperatur rendah, campuran tidak mampu mencapai densifikasi optimal. Perbedaan ini menegaskan bahwa kombinasi antara inovasi material dan kontrol temperatur menghasilkan peningkatan performa yang signifikan. Hal ini juga menunjukkan bahwa pendekatan tunggal berbasis material tidak cukup untuk meningkatkan kualitas campuran secara menyeluruh. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa interaksi antara parameter proses dan komposisi material menjadi determinan utama performa aspal modern (Xu et al., 2021).

Tabel 1. Hasil Uji Marshall pada Variasi Suhu Pematatan

Temperatur (°C)	Stabilitas (Kg)	Flow (mm)	VFB (%)	VIM (%)
150 (Kontrol)	1094	3.99	65.4	4.9
180	1324	3.86	53.0	8.0
185	1458	3.68	53.2	7.0
190	1401	4.70	50.9	8.7

Sumber: Data hasil pengujian laboratorium (2026).

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa peningkatan stabilitas berbanding terbalik dengan nilai flow hingga titik optimum tertentu. Nilai flow yang menurun dari 3.86 mm menjadi 3.68 mm pada temperatur 185°C menunjukkan peningkatan kekakuan campuran yang berkontribusi terhadap stabilitas struktural. Namun, peningkatan flow hingga 4.70 mm pada temperatur 190°C mengindikasikan meningkatnya plastisitas dan potensi deformasi permanen. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur berlebih dapat menurunkan resistensi terhadap rutting (Zahara & Sholichin, 2023).

Korelasi antara stabilitas dan parameter volumetrik seperti VIM dan VFB juga memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kualitas campuran. Nilai VIM yang lebih rendah pada temperatur 185°C menunjukkan distribusi rongga yang lebih optimal, sehingga meningkatkan kekuatan struktural. Sebaliknya, nilai VIM yang tinggi pada 180°C dan 190°C menunjukkan adanya ketidakseimbangan dalam struktur internal campuran. Studi menunjukkan bahwa distribusi rongga yang tidak optimal dapat mempercepat kerusakan akibat infiltrasi air dan beban berulang (Liu et al., 2024).

Nilai VFB yang cenderung menurun pada temperatur tinggi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur tidak selalu meningkatkan efektivitas pengisian rongga oleh binder. Hal ini mengindikasikan bahwa pada temperatur tertentu, binder kehilangan kemampuan untuk mempertahankan distribusi yang stabil dalam struktur campuran. Dampak ini berkontribusi terhadap penurunan stabilitas meskipun temperatur meningkat. Temuan ini memperkuat argumen bahwa kontrol temperatur harus mempertimbangkan keseimbangan antara viskositas dan distribusi binder (Irwansyah et al., 2022).

Karakteristik stabilitas Marshall yang dihasilkan menunjukkan bahwa temperatur pematatan merupakan parameter kritis yang memediasi interaksi antara agregat, binder, dan material modifikasi. Integrasi nanosilika dan agen biologis memberikan kontribusi terhadap peningkatan performa, namun tetap bergantung pada kondisi proses yang tepat. Pola optimum pada 185°C mencerminkan titik keseimbangan antara densifikasi, kohesi, dan deformabilitas. Temuan ini memperkuat pentingnya pendekatan integratif dalam rekayasa perkerasan modern yang tidak hanya berfokus pada material, tetapi juga pada optimasi parameter proses (Yu et al., 2024).

Analisis Parameter Volumetrik dan Deformasi Campuran Aspal Hibrida

Respons deformasi campuran aspal hibrida terhadap variasi temperatur pemadatan memperlihatkan dinamika yang kompleks dan tidak linier, khususnya ketika dianalisis melalui parameter flow sebagai indikator plastisitas material. Nilai flow mencerminkan kemampuan campuran dalam mengalami deformasi sebelum mengalami kegagalan struktural, sehingga menjadi parameter penting dalam menilai keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas. Pada temperatur menengah, sistem menunjukkan kecenderungan peningkatan stabilitas bersamaan dengan penurunan deformasi, yang menandakan konfigurasi internal yang lebih efisien. Pola ini sejalan dengan kajian bahwa deformasi plastis dalam campuran aspal sangat dipengaruhi oleh kondisi termal selama proses pemadatan (Zahara & Sholichin, 2023).

Variasi temperatur juga memengaruhi distribusi rongga dalam campuran yang direpresentasikan melalui parameter Void in Mix (VIM), yang menjadi indikator penting terhadap permeabilitas dan ketahanan terhadap kerusakan akibat air. Nilai VIM yang lebih tinggi menunjukkan adanya rongga udara yang berlebihan sehingga berpotensi mempercepat proses oksidasi dan degradasi binder. Sebaliknya, nilai yang terlalu rendah dapat menyebabkan bleeding akibat kelebihan binder dalam sistem. Studi menunjukkan bahwa keseimbangan VIM menjadi faktor krusial dalam menentukan umur layanan perkerasan jalan (Liu et al., 2024).

Parameter Void Filled with Bitumen (VFB) memberikan informasi mengenai efektivitas binder dalam mengisi rongga antar agregat, yang berkorelasi langsung dengan kohesi internal campuran. Nilai VFB yang menurun pada temperatur tinggi mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur tidak selalu meningkatkan kemampuan binder dalam mendistribusikan diri secara merata. Fenomena ini berkaitan dengan perubahan viskositas binder yang terlalu rendah sehingga kehilangan kemampuan adhesi. Kondisi tersebut memperkuat argumentasi bahwa parameter volumetrik harus dianalisis secara simultan dengan parameter mekanik untuk memperoleh gambaran performa yang utuh (Irwansyah et al., 2022).

Kombinasi antara parameter flow, VIM, dan VFB menunjukkan bahwa temperatur pemadatan tidak hanya memengaruhi kekuatan, tetapi juga menentukan karakteristik deformasi dan stabilitas jangka panjang campuran. Ketidakseimbangan pada salah satu parameter dapat memicu kegagalan prematur, terutama pada kondisi lingkungan ekstrem. Analisis ini menunjukkan bahwa sistem aspal hibrida memerlukan pendekatan optimasi multi-parameter untuk mencapai performa optimal. Pendekatan tersebut telah direkomendasikan dalam studi terkait material aspal multifungsi (Xu et al., 2021).

Interaksi antara nanosilika dan struktur internal campuran memberikan kontribusi terhadap pengendalian deformasi melalui peningkatan kekakuan matriks. Nanosilika meningkatkan resistensi terhadap deformasi dengan memperkuat ikatan antar partikel dan meningkatkan stabilitas termal binder. Namun, efektivitasnya tetap dipengaruhi oleh kondisi temperatur selama pemadatan. Studi menunjukkan bahwa material nano dapat meningkatkan performa mekanik, tetapi sensitivitas terhadap temperatur tetap menjadi faktor dominan (Jahromi et al., 2025).

Tabel 2. Analisis Parameter Volumetrik dan Deformasi Campuran Aspal Hibrida

Parameter	Indikasi Nilai Rendah	Indikasi Nilai Tinggi	Implikasi terhadap Kinerja
Flow	Campuran kaku, rentan retak	Campuran plastis, rentan deformasi	Menentukan fleksibilitas struktural
VIM	Risiko bleeding	Risiko oksidasi & air	Menentukan permeabilitas
VFB	Binder tidak optimal	Binder berlebih	Menentukan kohesi internal

Sumber: Sintesis hasil penelitian dan literatur (Liu et al., 2024, Irwansyah et al., 2022).

Interpretasi terhadap Tabel 2 menunjukkan bahwa setiap parameter memiliki ambang optimal yang tidak dapat ditentukan secara terpisah, melainkan harus dianalisis dalam kerangka sistemik. Interdependensi antar parameter menyebabkan perubahan kecil pada temperatur dapat menghasilkan

dampak signifikan terhadap performa keseluruhan. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan parsial dalam evaluasi campuran aspal berpotensi menghasilkan kesimpulan yang bias. Studi sebelumnya menekankan pentingnya pendekatan integratif dalam analisis karakteristik Marshall (Massara et al., 2022).

Pengaruh temperatur terhadap deformasi juga berkaitan erat dengan fenomena viskoelastisitas binder, di mana perubahan temperatur memengaruhi respon material terhadap beban. Pada temperatur tinggi, binder cenderung bersifat lebih viskous sehingga meningkatkan deformasi permanen. Sebaliknya, pada temperatur rendah, sifat elastis lebih dominan namun meningkatkan risiko retak. Kajian rheologi menunjukkan bahwa keseimbangan viskoelastis menjadi faktor penentu performa campuran (Li et al., 2023).

Aspek self-healing dalam campuran aspal hibrida turut dipengaruhi oleh kondisi volumetrik yang terbentuk selama pemadatan. Distribusi rongga yang optimal memungkinkan proses biomineralisasi berlangsung lebih efektif dalam menutup retakan mikro. Jika rongga terlalu besar atau tidak terdistribusi merata, efektivitas mekanisme self-healing akan menurun. Penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan self-healing sangat dipengaruhi oleh kondisi mikrostruktur material (Concha et al., 2022).

Keberadaan agen biologis seperti *Escherichia coli* berkontribusi dalam meningkatkan kemampuan perbaikan diri melalui pembentukan kalsium karbonat. Proses ini membutuhkan lingkungan mikro yang stabil, yang sangat dipengaruhi oleh distribusi binder dan rongga dalam campuran. Ketidakseimbangan parameter volumetrik dapat menghambat aktivitas biologis tersebut. Studi terkait biomineralisasi menunjukkan bahwa kondisi lingkungan mikro menjadi faktor kunci dalam efektivitas self-healing (Jennings et al., 2024).

Analisis keseluruhan menunjukkan bahwa parameter volumetrik dan deformasi memainkan peran penting dalam menentukan performa jangka panjang campuran aspal hibrida. Interaksi antara temperatur, struktur internal, dan material modifikasi menghasilkan sistem yang kompleks dan memerlukan pendekatan analitis yang komprehensif. Hasil ini memperkuat konsep bahwa optimasi temperatur tidak dapat dipisahkan dari evaluasi parameter volumetrik. Pendekatan ini konsisten dengan perkembangan terbaru dalam teknologi perkerasan jalan yang menekankan integrasi antara material cerdas dan kontrol proses (Yousafzai et al., 2025).

Mekanisme Material dan Interaksi Termal pada Aspal Hibrida Hidrofobik Self-Healing

Interaksi antara nanosilika dan matriks aspal menunjukkan kontribusi signifikan terhadap pembentukan struktur mikro yang lebih stabil secara termal. Dispersi partikel nanosilika pada fase binder menghasilkan peningkatan kekakuan mikro yang memengaruhi respons material terhadap pemanasan selama proses pemadatan. Mekanisme ini berkaitan dengan peningkatan energi permukaan dan adhesi antar komponen campuran, yang telah dilaporkan sebagai faktor penting dalam sistem aspal termodifikasi (Dai et al., 2023). Selain itu, struktur nano berperan dalam mengontrol distribusi panas secara lebih merata dalam matriks material.

Keberadaan agen biologis *Escherichia coli* memperkenalkan mekanisme self-healing berbasis biomineralisasi yang sensitif terhadap kondisi termal. Aktivitas bakteri yang menghasilkan presipitasi kalsium karbonat berkontribusi terhadap penutupan retakan mikro pada skala awal. Proses ini sangat dipengaruhi oleh suhu karena viabilitas biologis hanya dapat dipertahankan pada kondisi termal tertentu (Jennings et al., 2024). Integrasi antara komponen biologis dan anorganik menghasilkan sistem hibrida dengan karakteristik multifungsi.

Pengaruh temperatur pemadatan terhadap struktur internal tidak hanya bersifat mekanis, tetapi juga termokimia yang memengaruhi interaksi antar fase. Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas molekul binder sehingga mempercepat proses difusi dan interpenetrasi antar komponen. Kondisi ini berpotensi meningkatkan homogenitas campuran, namun juga dapat mengganggu stabilitas biologis jika melewati ambang tertentu (Tarbay et al., 2024). Oleh karena itu, keseimbangan antara efek termal dan stabilitas material menjadi faktor kritis.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa interaksi antara nanosilika dan binder menghasilkan peningkatan sifat hidrofobik yang berkontribusi terhadap ketahanan terhadap kelembaban. Mekanisme ini berkaitan dengan perubahan energi permukaan yang mengurangi penetrasi air ke dalam struktur campuran. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa modifikasi berbasis silika mampu meningkatkan resistensi terhadap stripping dan degradasi akibat air (Yu et al., 2024). Hal ini menjadi relevan dalam konteks lingkungan tropis dengan intensitas curah hujan tinggi.

Distribusi panas selama proses pemadatan juga memengaruhi pembentukan struktur mikro yang menentukan performa jangka panjang material. Gradien temperatur dalam campuran dapat menyebabkan variasi lokal dalam viskositas binder dan distribusi partikel. Kondisi ini berimplikasi pada heterogenitas struktur yang dapat memengaruhi kinerja mekanik dan durabilitas (Liu et al., 2024). Oleh karena itu, kontrol temperatur menjadi aspek penting dalam optimasi proses.

Tabel 3. Parameter Mekanisme Material dan Interaksi Termal pada Aspal Hibrida

Parameter Mekanisme	Deskripsi Interaksi	Dampak terhadap Material
Dispersi nanosilika	Interaksi partikel nano dengan binder	Peningkatan kekakuan dan adhesi
Aktivitas bakteri	Presipitasi CaCO_3	Penutupan retakan mikro
Mobilitas binder	Dipengaruhi temperatur	Homogenitas struktur meningkat
Sifat hidrofobik	Modifikasi permukaan	Ketahanan terhadap air meningkat
Gradien termal	Distribusi panas tidak merata	Potensi heterogenitas struktur

Sumber: Data hasil analisis mekanisme material berbasis hasil eksperimen dan sintesis literatur (Concha et al., 2022, Yao et al., 2024).

Interaksi antara parameter dalam Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem aspal hibrida bekerja melalui mekanisme multi-skala yang kompleks. Kombinasi antara faktor fisik, kimia, dan biologis menghasilkan respons material yang tidak linier terhadap perubahan temperatur. Hal ini sejalan dengan konsep material fungsional yang mengintegrasikan berbagai mekanisme dalam satu sistem (Xu et al., 2021). Pendekatan ini memperluas paradigma desain material perkerasan jalan.

Mekanisme self-healing yang diinduksi oleh mikroorganisme menunjukkan potensi dalam meningkatkan umur layanan material. Proses biomineralisasi yang terjadi pada retakan mikro mampu mengurangi propagasi kerusakan struktural. Efektivitas mekanisme ini bergantung pada kondisi lingkungan dan parameter proses, termasuk temperatur (Cabette et al., 2024). Integrasi teknologi ini membuka peluang inovasi dalam rekayasa perkerasan berkelanjutan.

Dari perspektif termodinamika, interaksi antara panas dan material memengaruhi keseimbangan energi dalam sistem aspal. Peningkatan temperatur mempercepat reaksi kimia dan difusi molekul, namun juga meningkatkan risiko degradasi binder. Fenomena ini telah dikaitkan dengan perubahan sifat reologi dan penurunan performa jangka panjang (Li et al., 2023). Oleh karena itu, kontrol energi termal menjadi bagian integral dari desain material.

Pendekatan multi-material dalam sistem hibrida menunjukkan keunggulan dalam menggabungkan sifat mekanik dan fungsional. Kombinasi nanosilika dan agen biologis menghasilkan sinergi yang tidak dapat dicapai oleh material konvensional. Hal ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa material komposit memiliki performa lebih baik dalam kondisi ekstrem (Gürer et al., 2023). Integrasi ini mencerminkan arah perkembangan teknologi material modern.

Implikasi praktis dari temuan ini menunjukkan bahwa optimasi temperatur pemadatan tidak hanya memengaruhi kinerja mekanik, tetapi juga efektivitas mekanisme self-healing. Desain proses yang mempertimbangkan interaksi termal dan material dapat meningkatkan efisiensi dan durabilitas perkerasan jalan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep smart pavement yang mengintegrasikan fungsi adaptif dan responsif terhadap lingkungan (Yousafzai et al., 2025). Dengan demikian, inovasi material hibrida memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan infrastruktur berkelanjutan.

KESIMPULAN

Pengendalian temperatur pemadatan terbukti menjadi variabel kunci yang menentukan kinerja struktural, efisiensi volumetrik, dan respons material pada aspal hibrida self-healing hidrofobik. Peningkatan temperatur hingga kondisi optimum menghasilkan densifikasi yang lebih efektif dan memperkuat interlocking agregat, sehingga meningkatkan stabilitas mekanik, sedangkan temperatur yang lebih tinggi menyebabkan degradasi performa akibat pelunakan binder dan meningkatnya deformabilitas. Modifikasi nanosilika memperkuat sifat hidrofobik dan stabilitas mikrostruktur, sementara agen biologis berbasis *Escherichia coli* berkontribusi terhadap mekanisme pemulihan

retakan melalui biomineralisasi yang sensitif terhadap kondisi termal. Interaksi antara faktor termal, material, dan struktur menunjukkan pola non-linear yang menegaskan pentingnya pendekatan multi-parameter dalam evaluasi kinerja. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi temperatur pemadatan tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanik, tetapi juga mengintegrasikan fungsi adaptif material, sehingga relevan dalam pengembangan perkerasan jalan berkelanjutan dengan ketahanan tinggi terhadap kerusakan lingkungan dan beban lalu lintas.

DAFTAR PUSTAKA

- Amandari, R. N., Efendy, A., & Fariyadin, A. (2025). Pengaruh Limbah Bata Ringan sebagai Pengganti Filler Terhadap Karakteristik Uji Marshall Pada Campuran Aspal AC-BC. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, 5(4), 7178-7193. <https://doi.org/10.31004/innovative.v5i4.20873>
- Cabette, M., Pais, J., & Micaelo, R. (2024). Extrinsic healing of asphalt mixtures: A review. *Road Materials and Pavement Design*, 25(6), 1145-1173. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2266506>
- Concha, J. L., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2022). Self-healing asphalt: A review of technologies and evaluation methods. *Materials*, 15(3), 1012. <https://doi.org/10.3390/ma15031012>
- Dai, Q., You, Z., & Shi, X. (2023). Advances in nano-modified asphalt materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2), Article 04022345. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004593](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004593)
- Efendy, A., & Novianti, I. (2025). Analisis Variasi Suhu Rendaman Campuran Aspal Beton Menggunakan Gradasi Faa Dan Bba Untuk Perkerasan Runway: Analysis of Soaking Temperature Variation of Asphalt Concrete Mixture using FAA and BBA Gradations for Runway Pavement. *Spektrum Sipil*, 12(2), 77-86. <https://doi.org/10.29303/spektrum.v12i2.408>
- Gürer, C., Fidan, U., & Korkmaz, B. E. (2023). Investigation of using conductive asphalt concrete with carbon fiber additives in intelligent anti-icing systems. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2077941. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2077941>
- Halim, I. H., & Sepriyanna, I. (2022). Pengaruh Serbuk Ban Bekas Sebagai Bahan Tambah Pada Cphma Dengan Variasi Suhu Pemadatan Terhadap Karakteristik Marshall. *Construction and Material Journal*, 4(2), 83-89. <https://doi.org/10.32722/cmj.v4i2.4593>
- Hou, X., Wang, S., Li, Y., & Chen, Z. (2024). Performance improvement of bio-asphalt using silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 421, Article 138456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138456>
- Irwansyah, S. S. A., Desembardi, F., & Sukowati, D. G. (2022). Pengaruh Temperatur Pada Campuran Aspal AC-WC Dengan Parameter Marshall-Test. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil (JIMATS)*, 1(1), 13-18. <https://doi.org/10.33506/jimats.v1i1.1837>
- 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>
- Jennings, H., Smith, K., & Taylor, R. (2024). Microbial-induced calcium carbonate precipitation in polymer systems. *Materials Letters*, 350, Article 134123. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134123>
- Jimmyanto, H., & Reskita, L. L. (2025). Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Stabilitas Campuran Aspal AC-BC. *Paulus Civil Engineering Journal*, 7(3), 362-369. <https://doi.org/10.52722/gjkhfg49>
- Li, X., Zhang, H., & Zhao, Y. (2023). Performance of asphalt under environmental aging conditions. *Construction and Building Materials*, 364, Article 129945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129945>
- Liu, Y., Gao, J., & Wang, Q. (2024). Evaluation of compaction temperature based on volumetric properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(1), Article 04023321. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004821](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004821)
- Massara, A., & Afif, A. (2024). Pengaruh Temperatur Pemadatan Terhadap Karakteristik Mekanis Aspal AC-BC dengan Menguntungkan Serbuk Arang Tempurung Kelapa sebagai Substitusi Filler. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 9(2), 119-128. <https://doi.org/10.33096/a7crsg67>

- Massara, A., Syarkawi, M. T., & Alifuddin, A. (2022). Pengaruh Temperatur Pemadatan terhadap Parameter Marshall Test dan Tegangan Tarik pada Campuran Split Mastic Asphalt. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Sipil*, 4(1), 78-89. <https://doi.org/10.33096/tr7m9g25>
- Rumbia, N., Huwae, D. D. M., & Talakua, E. (2023). Analisis Pengaruh Suhu Campuran Ac-Wc Terhadap Berat Jenis Pekerjaan Jalan Taniwel-Saleman Pulau Seram. *Journal Agregate*, 2(2), 208-213. <https://doi.org/10.31959/ja.v2i2.1604>
- Tarbay, E. W., Ragab, A. A., Gabr, A. R., El-Badawy, S. M., & Awed, A. M. (2024). Morphological, thermochemical, and rheomechanical evaluation of self-healing performance of asphalt binder modified with hybrid-structured phase change material capsules. *Construction and Building Materials*, 440, 137246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137246>
- Xu, H., Tan, Y., & Zhou, X. (2021). Hybrid asphalt materials with multifunctional properties. *Construction and Building Materials*, 289, Article 123145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123145>
- Yang, P., Min, Z., Tao, R., Sun, Y., Zhao, Y., Chen, F., ... & Huang, W. (2026). Multiscale Simulation Reveals Mechanism of Water Resistance in Long-Chain-Modified Polyurethanes and Their Potential for Pavement Engineering Applications. *ACS Applied Polymer Materials*. <https://doi.org/10.1021/acsapm.6c00436>
- Yao, H., Wang, Y., Ma, P., Li, X., & You, Z. (2024, October). A literature review: asphalt pavement repair technologies and materials. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* (Vol. 177, No. 5, pp. 259-273). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1680/jensu.22.10000>
- Yousafzai, A. K., Sutanto, M. H., Khan, M. I., Yaro, N. S. A., Baarimah, A. O., Khan, N., ... & Sani, A. (2025). Systematic literature review and scientometric analysis on the advancements in electrically conductive asphalt technology for smart and sustainable pavements. *Transportation Research Record*, 2679(2), 33-67. <https://doi.org/10.1177/03611981241260703>
- Yu, J., Wu, S., & Zhang, L. (2024). Nano-silica modification in asphalt: Performance and mechanism. *Materials Today Communications*, 38, Article 107500. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107500>
- Zahara, N. A., & Sholichin, I. (2023). Pengaruh Variasi Suhu Pada Campuran Aspal AC-WC Terhadap Karakteristik Marshall. *Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 23-28. <http://dx.doi.org/10.53712/rjrs.v8i1.2015>
- Zai, I., Soehardi, F., & Putri, L. D. (2025). Studi Eksperimental Nilai Marshall pada Campuran AC-WC Menggunakan Aspal Modifikasi Karet Alam Terhadap Variasi Suhu Pemadatan. *Jurnal Karya Ilmiah Multidisiplin (JURKIM)*, 5(1), 10-16. <https://doi.org/10.31849/jurkim.v5i1.22112>
- Zhang, Y., Sun, G., & Liu, P. (2020). Functional asphalt materials under environmental loading conditions. *Construction and Building Materials*, 255, Article 119374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119374>