

PENGARUH TEMPERATUR KOMPAKSI TINGGI TERHADAP KINERJA
ASPAL HIBRIDA HIDROFOBİK DAN *SELF-HEALING* BERBASIS *E. COLI*

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains



Oleh:

YOSEF ARYAWANDA

NIM. 22034036

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI PADANG

2026

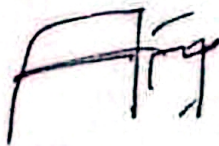
PERSETUJUAN SKRIPSI

PENGARUH TEMPERATUR KOMPAKSI TINGGI TERHADAP KINERJA ASPAL HIBRIDA HIDROFOBİK DAN *SELF-HEALING* BERBASIS *E. COLI*

Nama : Yosef Aryawanda
NIM : 22034036/2022
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, 20 Mei 2026

Mengetahui:
Ketua Departemen Fisika



Prof. Dr. Azrizal, M. Si.
NIP.196606031992031001

Disetujui Oleh:
Pembimbing



Prof. Dr. Ratnawulan, M.Si
NIP. 1196901201993032002

PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

Nama : Yosef Aryawanda
NIM : 22034036
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

PENGARUH TEMPERATUR KOMPAKSI TINGGI TERHADAP KINERJA ASPAL HIBRIDA HIDROFOBİK DAN *SELF-HEALING* BERBASIS *E. COLI*

Dinyatakan Lulus setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Padang, 20 Mei 2026

Tim Penguji

Nama

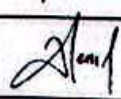
Tanda tangan

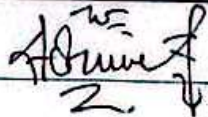
Ketua : Prof. Dr. Ratnawulan, M.Si

Anggota : Dr. Leni Aziyus Fitri, M.Si

Anggota : Syafri, S.Pd., M.Si.







SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Yosef Aryawanda
NIM : 22034036
Tempat/Tanggal Lahir : Sungai Aro/26 September 2003
Program Studi : Fisika NK
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : **PENGARUH TEMPERATUR KOMPAKSI TINGGI
TERHADAP KINERJA ASPAL HIBRIDA
HIDROFOBİK DAN SELF HEALING BERBASIS
E.COLI**

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Karya tulis/skripsi ini adalah hasil karya saya dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik (sarjana) baik di UNP maupun perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain kecuali tim pembimbing.
3. Pada karya tulis/skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali tertulis dengan jelas dicantumkan pada kepustakaan.
4. Karya tulis/skripsi ini sah apabila telah ditandatangani Asli oleh tim pembimbing dan tim penguji.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran di dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima **Sanksi Akademik** berupa pencabutan gelar akademik yang telah diperoleh karena karya tulis/skripsi ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Padang, Juni 2026
Yang Menyatakan



Yosef Aryawanda
NIM. 22034036

**PENGARUH TEMPERATUR KOMPAKSI TINGGI TERHADAP
KINERJA ASPAL HIBRIDA HIDROFOBİK DAN *SELF-HEALING*
BERBASIS *E. COLI***

YOSEF ARYAWANDA

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur kompaksi terhadap kinerja aspal hibrida yang bersifat hidrofobik dan memiliki potensi *self-healing* berbasis mikroorganisme *Escherichia coli*. Aspal dimodifikasi menggunakan nanosilika sebagai agen hidrofobik dan bakteri *E. coli* sebagai agen biomineralisasi melalui mekanisme *microbially induced calcium carbonate precipitation* (MICP). Variasi temperatur kompaksi yang digunakan adalah 180°C, 185°C, dan 190°C dengan 150°C sebagai kontrol.

Penelitian dilakukan secara eksperimental melalui pembuatan benda uji dengan metode Marshall, pengujian stabilitas dan flow, pengukuran sudut kontak, serta karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), dan Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur kompaksi berpengaruh terhadap performa mekanik dan sifat permukaan aspal hibrida. Nilai stabilitas meningkat dari 1324 kg pada temperatur 180°C menjadi optimum sebesar 1458 kg pada 185°C, kemudian menurun menjadi 1401 kg pada 190°C. Nilai sudut kontak meningkat seiring kenaikan temperatur kompaksi, dengan nilai tertinggi sebesar 136.72° pada 190°C yang menunjukkan peningkatan sifat hidrofobik permukaan.

Karakterisasi XRD dan FTIR mengindikasikan keberadaan fase SiO₂ dan CaCO₃ yang diduga berkaitan dengan proses biomineralisasi pada permukaan aspal. Hasil FESEM menunjukkan perubahan morfologi permukaan yang lebih homogen serta indikasi pengisian mikrovoid pada temperatur tertentu. Secara keseluruhan, temperatur kompaksi 185°C memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas mekanik, sifat hidrofobik, dan kestabilan struktur mikro. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi nanosilika dan mikroorganisme memiliki potensi untuk meningkatkan durabilitas aspal pada lingkungan tropis, meskipun diperlukan pengujian lanjutan untuk memvalidasi mekanisme self-healing secara kuantitatif.

Kata Kunci: aspal hibrida, temperatur kompaksi, hidrofobik, self-healing, *Escherichia coli*, MICP.

THE EFFECT OF HIGH COMPACTION TEMPERATUR ON THE PERFORMANCE OF HYDROPHOBIC AND SELF-HEALING ASPHALT BASED ON E. COLI

YOSEF ARYAWANDA

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of compaction temperatur variation on the performance of hybrid asphalt with hydrophobic properties and self-healing potential based on *Escherichia coli* microorganisms. The asphalt was modified using nanosilica as a hydrophobic agent and *E. coli* bacteria as a biomineralization agent through the mechanism of *microbially induced calcium carbonate precipitation* (MICP). The compaction temperatures applied in this study were 180°C, 185°C, and 190°C.

The research was conducted experimentally through the preparation of Marshall specimens, followed by stability and flow tests, contact angle measurements, and material characterization using X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM).

The results showed that compaction temperatur affected the mechanical performance and surface properties of the hybrid asphalt. The Marshall stability increased from 1324 kg at 180°C to an optimum value of 1458 kg at 185°C, then decreased to 1401 kg at 190°C. The contact angle value increased with increasing compaction temperatur, reaching the highest value of 136.72° at 190°C, indicating enhanced hydrophobic surface properties.

XRD and FTIR characterization indicated the presence of SiO₂ and CaCO₃ phases, which were suspected to be associated with the biomineralization process on the asphalt surface. FESEM analysis showed a more homogeneous surface morphology and indications of microvoid filling at certain temperatures. Overall, the compaction temperatur of 185°C provided the best balance between mechanical stability, hydrophobic properties, and microstructural stability.

This study demonstrates that the integration of nanosilica and microorganisms has the potential to improve asphalt durability in tropical environments, although further investigations are required to quantitatively validate the self-healing mechanism.

Keyword: hybrid asphalt, compaction temperatur, hydrophobic, self-healing, *Escherichia coli*, MICP

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur diucapkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “pengaruh temperatur kompaksi tinggi terhadap kinerja aspal hibrida hidrofobik dan *self-healing* berbasis *E. Coli*” guna memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana Sains di Program Studi Fisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

Selama penyusunan skripsi, penulis mendapatkan dukungan, arahan dan bimbingan dari berbagai pihak, sehingga banyak kemajuan yang didapatkan penulis untuk penyelesaian skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Nofi Yendri Sudiar, S.Si., M.Si selaku dosen penasihat akademik.
2. Ibu Prof. Dr. Ratnawulan M.Si selaku dosen pembimbing di Laboratorium.
3. Ibu Dr. Leni Aziyus Fitri, S.Pd., M.Si. selaku dosen Penguji 1.
4. Bapak Syafri S.Pd,M.Si., selaku dosen Penguji 2.
5. Bapak Prof. Dr. Asrizal, M,Si Selaku Kepala Departemen Kimia.
6. Bapak Dr. Harman Amir, M.Si Kepala Program Studi Fisika, FMIPA, UNP.
7. Orang tua Tercinta penulis Bapak Yurnalis dan Ibu Yarni Efriza yang telah meridhoi dan mendukung sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
8. Kekasih tercinta Penulis Angle Cendriani yang telah membersamai dan memberikan support dalam membantu penulisan.

9. Rekan tim riset 2022 yang telah kebersamai dan saling membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
10. Sahabat dan teman-teman terdekat penulis yang telah memberikan masukan dan semangat kepada penulis selama pembuatan skripsi ini.
11. Rekan seperjuangan Program Studi Kimia 2022 yang telah memberikan masukan dan semangat kepada penulis selama pembuatan skripsi ini.

Penulis menyadari sepenuhnya dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan dan kelemahan yang dimiliki, baik itu dalam penulisan maupun penggunaan bahasa. Untuk itu, penulis mengharapkan masukan dan saran dari berbagai pihak yang bersifat membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berdoa semoga segala bantuan yang telah diberikan tersebut mendapat balasan pahala dari Allah SWT.

Padang, 2 Februari 2026

Yosef Aryawanda

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	5
C. Batasan Masalah.....	6
D. Rumusan Masalah	7
E. Tujuan Penelitian	8
F. Manfaat Penelitian	8
BAB II	10
TINJAUAN PUSTAKA	10
A. Aspal dan Karakteristik Umum.....	10
1. Defenisi Aspal.....	10
2. Parameter-parameter Dasar pada Aspal	11
B. Hidrofobik Pada Aspal.....	13
1. Pengertian Hidrofobik.....	14
2. Prinsip Hidrofobisitas Berbasis Nanosilika	14
3. Aplikasi Nanosilika dengan Metode Pencampuran pada Aspal	15
4. Teori Sudut Kontak dan Model <i>Cassie-Baxter</i>	15
5. Kohesi-Adhesi.....	17
6. Metode Pengujian Hidrofobisitas Berbasis Citra dan ImageJ.....	17
7. Keterkaitan Hidrofobisitas dengan Variasi Temperatur Kompaksi	18

8.	Aspal Hidrofobik.....	18
C.	Teknologi <i>Self-Healing</i> pada Aspal	21
1.	Konsep Dasar <i>Self-Healing</i> Aspal.....	21
2.	Bakteri <i>Escherichia coli</i>	23
3.	<i>Self-Healing</i> Berbasis Mikroorganisme (<i>E. coli</i>).....	27
4.	Ketahanan dan Aktivitas <i>E. coli</i> dalam Matriks Material	28
5.	Metode Aplikasi <i>Self-Healing</i> Berbasis <i>E. coli</i>	29
6.	Konsentrasi <i>E. coli</i> yang Ideal	30
7.	Mekanisme Presipitasi CaCO_3 dan Penutupan Retakan	32
8.	Metode Uji <i>Self-Healing</i>	32
D.	Pengaruh Temperatur Kompaksi terhadap Sifat mekanik Aspal	34
1.	Defenisi Temperatur Kompaksi	34
2.	Kegunaan Temperatur Kompaksi	34
3.	Penelitian Terdahulu Terkait Temperatur Kompaksi.....	36
E.	Alat Karakterisasi Penelitian.....	39
1.	X-Ray Diffraction (XRD)	39
2.	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	40
3.	Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM).....	41
BAB III.....		43
METODE PENELITIAN		43
A.	Jenis Penelitian.....	43
B.	Variabel Penelitian	43
C.	Instrument Penelitian	44
D.	Prosedur Penelitian.....	48
E.	Teknik Pengumpulan Data	53
F.	Teknik Analisis Data.....	53
BAB IV		58
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		58
A.	Hasil Penelitian	58
1.	Deskripsi Data.....	58
2.	Analisis Data	90

B. Pembahasan.....	112
BAB V.....	117
PENUTUP.....	117
A. Kesimpulan	117
B. Saran.....	118
DAFTAR PUSTAKA	120
LAMPIRAN.....	125

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Parameter dasar karakterisasi aspal (Arifin et al., 2024)	11
Tabel 2. Hasil Uji Aspal Penetrasi 60/70 (S Arifin et al, 2024)	37
Tabel 3. Hasil Uji Marshall Asphalt Temperatur Kompaksi(S Arifin et al, 2024).	38
Tabel 4. Data Marshall Stability.....	59
Tabel 5. Data Pengukuran sudut Kontak Temperatur Kompaksi 150°C	61
Tabel 6. Data Pengukuran sudut Kontak Temperatur Kompaksi 180°C	62
Tabel 7. Data Pengukuran sudut Kontak Temperatur Kompaksi 185°C	62
Tabel 8. Data Pengukuran sudut Kontak Temperatur Kompaksi 190°C	63
Tabel 9. Tabel Self-healing (CCR).....	65
Tabel 10. Trend data puncak difraksi utama yang teridentifikasi pada sampel aspal hibrida	76
Tabel 11. Database PDF card Xrd Puncak dominan.....	106
Tabel 12. Pattern List Sampel aspal 150°C dengan High score plus.....	106
Tabel 13. Pattern List Sampel aspal 180 °C dengan High score plus.....	107
Tabel 14. Pattern List Sampel aspal 185°C dengan High score plus.....	107
Tabel 15. Pattern List Sampel aspal 190°C dengan High score plus.....	107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Aspal dan Komponennya	13
Gambar 2. Sudut Kontak Hidrofobik	20
Gambar 3. Sifat Hidrofobik pada Aspal	23
Gambar 4. Self-Healing Beton	25
Gambar 5. Persentase Kelangsungan Hidup Bakteri	28
Gambar 6. Hasil SEM Berbagai Konsentrasi Self-Healing	30
Gambar 7. Pertumbuhan dan Kelangsungan Hidup Bakteri	31
Gambar 8. Bakteri E. coli	33
Gambar 9. Sudut Kontak Aspal Hibrida Temperatur 150°C	60
Gambar 10. Sudut Kontak Aspal Hibrida Temperatur 180°C ...	62
Gambar 11. Sudut Kontak Aspal Hibrida Temperatur 185°C ...	63
Gambar 12. Sudut Kontak Aspal Hibrida Temperatur 190°C ...	64
Gambar 13. Difraktogram XRD Aspal Hibrida Temperatur 180°C	66
Gambar 14. Difraktogram XRD Aspal Hibrida Temperatur 185°C	67
Gambar 15. Difraktogram XRD Aspal Hibrida Temperatur 190°C	68
Gambar 16. Spektrum FTIR Aspal Hibrida Temperatur 180°C	70
Gambar 17. Spektrum FTIR Aspal Hibrida Temperatur 185°C	71
Gambar 18. Spektrum FTIR Aspal Hibrida Temperatur 190°C	72
Gambar 19. Morfologi FESEM Aspal Hibrida Temperatur 180°C	75
Gambar 20. Morfologi FESEM Aspal Hibrida Temperatur 185°C	76
Gambar 21. Morfologi FESEM Aspal Hibrida Temperatur 190°C	77

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kerusakan perkerasan jalan masih menjadi permasalahan infrastruktur yang persisten, khususnya di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia, yang dicirikan oleh intensitas lalu lintas tinggi, curah hujan besar, serta fluktuasi temperatur harian yang ekstrem. Kombinasi faktor-faktor tersebut mempercepat degradasi material perkerasan melalui mekanisme deformasi plastis (*rutting*), pelepasan ikatan aspal–agregat akibat air (*stripping*), serta pembentukan mikroretakan yang berkembang menjadi retak struktural dan menurunkan umur layanan jalan secara signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekatan material konvensional belum sepenuhnya mampu menjawab kompleksitas lingkungan layanan jalan di daerah tropis. (Li et al., 2023).

Aspal penetrasi 60/70 hingga saat ini masih menjadi standar nasional dalam konstruksi perkerasan jalan. Secara spesifikasi, aspal ini memenuhi persyaratan viskositas, titik lembek, dan stabilitas termal yang ditetapkan Bina Marga. Namun, berbagai penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi siklus basah–kering dan paparan suhu tinggi yang berulang, aspal konvensional mengalami penurunan kinerja mekanik dan adhesi terhadap agregat. Keterbatasan ini menegaskan adanya celah antara pemenuhan spesifikasi laboratorium dengan performa aktual di lapangan, sehingga diperlukan strategi modifikasi material untuk meningkatkan ketahanan aspal terhadap air dan temperatur tinggi secara simultan (Sistra, Mawid Dwi et al., 2016).

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengatasi permasalahan kelembapan adalah modifikasi hidrofobik, khususnya melalui pemanfaatan material berbasis nanosilika. Hasil penelitian oleh Hamedi et al., (2020) menunjukkan bahwa pelapisan hidrofobik pada permukaan agregat mampu memodifikasi energi bebas permukaan dengan meningkatkan komponen asam dan menurunkan komponen basa, yang secara termodinamika menurunkan energi pemisahan sistem aspal–agregat. Dampak langsungnya adalah peningkatan adhesi dan penurunan kecenderungan stripping). Behnood et al., (2021) melaporkan bahwa *fumed silica nanoparticles (FSNPs)* mampu meningkatkan kekakuan aspal pada suhu tinggi, memperbaiki ketahanan *rutting*, serta menekan efek penuaan jangka pendek dan panjang melalui penguatan interaksi nanosilika dengan fraksi *asphaltene*. Meskipun demikian, efektivitas lapisan hidrofobik dan stabilitas struktur nano ini sangat dipengaruhi oleh kondisi proses termal selama pencampuran dan pemadatan, yang hingga kini masih jarang dikaji secara spesifik.

Peningkatan ketahanan saja belum cukup untuk mengatasi akumulasi kerusakan mikro yang tak terelakkan selama masa layanan. Oleh karena itu, konsep material cerdas berupa aspal *self-healing* mulai dikembangkan sebagai pendekatan pelengkap. Concha et al. (2022), menunjukkan bahwa aditif tertentu, termasuk mikrokapsul polimer berisi agen penyembuh, mampu memperpanjang umur layanan aspal secara signifikan. Namun, pendekatan kimia sintesis ini memiliki keterbatasan dari sisi keberlanjutan dan potensi degradasi pada siklus termal berulang. Sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan, pendekatan berbasis mikroorganisme mulai mendapat perhatian.

Teknologi *self-healing* mulai dikembangkan untuk meningkatkan umur layanan aspal. Studi oleh Octriany & Ratnawulan,(2023) membuktikan bahwa mikroorganisme pada konsentrasi tertentu (10^3 sel/mL) mampu memicu proses biomineralisasi yang efektif dalam menutup mikroretakan secara alami. Mekanisme ini bekerja melalui pembentukan endapan mineral, seperti CaCO_3 yang mengisi celah retakan dan memulihkan kontinuitas mikrostruktur. Pendekatan biologis ini dinilai lebih ramah lingkungan dan adaptif, namun kinerjanya sangat bergantung pada kondisi lingkungan permukaan aspal, termasuk porositas, kelembapan, dan riwayat perlakuan termal material. Temuan tersebut diperkuat oleh studi eksperimental pada sistem non-semen oleh Jennings et al., (2024). yang menunjukkan bahwa bakteri *E. coli* mampu bertahan hidup dan tetap aktif memicu presipitasi kalsium karbonat pada matriks polimer tipis pada kisaran konsentrasi rendah hingga menengah ($\approx 10^2$ – 10^4 sel/mL). Studi ini menegaskan bahwa *E. coli* tidak hanya relevan pada sistem beton, tetapi juga pada material berbasis matriks organik, selama kondisi lingkungan dan perlakuan termalnya masih berada dalam batas toleransi biologis. Kesamaan jenis bakteri dan orde konsentrasi ini memberikan justifikasi ilmiah yang kuat bagi pemilihan *E. coli* sebagai agen *self-healing* dalam penelitian ini, sekaligus memperkuat asumsi bahwa mekanisme biomineralisasi tetap dapat berlangsung pada permukaan aspal yang telah mengalami proses pemadatan, selama struktur mikro dan kondisi permukaannya mendukung. Pendekatan berbasis mikroorganisme dinilai lebih berkelanjutan dibandingkan metode kimia sintetis.

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa penggabungan sifat hidrofobik dan *self-healing* dalam satu sistem material yang dikenal sebagai aspal hibrida berpotensi memberikan solusi yang lebih komprehensif terhadap kerusakan perkerasan. Xu et al. (2021) melaporkan bahwa nanosilika termodifikasi tidak hanya meningkatkan sifat hidrofobik, tetapi juga memperkuat ikatan aspal–agregat sehingga menciptakan lingkungan permukaan yang lebih stabil. Sementara itu, Zhang et al., (2020) dan Jr et al., (2020) menekankan bahwa integrasi fungsi ganda hidrofobik dan *self-healing* dapat meningkatkan ketahanan aspal terhadap kondisi lingkungan kompleks yang melibatkan air, panas, dan penuaan simultan. Namun, sebagian besar studi tersebut masih memfokuskan pada karakterisasi material atau performa mekanik tanpa mengaitkannya secara langsung dengan parameter proses konstruksi, khususnya temperatur kompaksi.

Temperatur kompaksi merupakan parameter kunci dalam pembentukan struktur internal campuran aspal karena menentukan viskositas binder, derajat densifikasi, distribusi rongga, serta ketebalan film aspal pada agregat. Penelitian oleh S Arifin et al, (2024), menunjukkan bahwa peningkatan temperatur kompaksi aspal Pen 60/70 hingga 180–190°C mampu meningkatkan stabilitas Marshall tanpa menyebabkan degradasi termal, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai *flash point* yang masih aman. Namun, temuan ini terbatas pada aspal konvensional dan belum mempertimbangkan keberadaan aditif nanosilika maupun agen biologis. Padahal, temperatur kompaksi yang terlalu tinggi berpotensi mempengaruhi struktur lapisan hidrofobik dan secara tidak langsung

menentukan kondisi permukaan yang akan menjadi medium aktivitas mikroorganisme self-healing.

Melihat perkembangan tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur kompaksi terhadap kinerja aspal hibrida bersifat hidrofobik dan self-healing berbasis mikroorganisme *E. coli*. Kajian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman mekanistik mengenai hubungan antara proses termal, struktur material, dan performa fungsional, serta menjadi dasar pengembangan formulasi aspal yang lebih tahan lama, adaptif terhadap iklim tropis, dan berkelanjutan.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan utama dalam pengembangan material perkerasan jalan yaitu:

1. Variasi temperatur kompaksi dalam rentang tinggi (180–190°C) terbukti memengaruhi densitas, stabilitas, dan kinerja mekanik aspal Pen 60/70 (Arifin et al., 2024), namun belum diketahui bagaimana perubahan suhu ini mempengaruhi performa aspal hibrida yang dimodifikasi dengan nanosilika dan bakteri.
2. Aspal yang telah dimodifikasi hidrofobik dengan nanosilika memiliki perilaku interaksi air yang berbeda, tetapi efek temperatur kompaksi terhadap efektivitas lapisan hidrofobik ini belum pernah dianalisis secara sistematis.
3. Mekanisme *self-healing* berbasis *E. coli*, bergantung pada kondisi lingkungan dan struktur pori permukaan, namun belum diketahui

bagaimana kondisi kompaksi suhu tinggi memengaruhi kemampuan bakteri melakukan biomineralisasi CaCO_3 setelah aplikasi.

4. Belum terdapat penelitian yang mengintegrasikan hidrofobisitas (nanosilika) dan *self-healing* (mikroorganisme) dalam satu sistem aspal, serta mengkaji respons keduanya terhadap variasi temperatur kompaksi secara simultan.

C. Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan dapat dilaksanakan secara efektif, maka batasan masalah dapat ditetapkan sebagai berikut:

1. Variasi temperatur kompaksi yang diteliti dibatasi pada tiga kondisi, yaitu 180°C , 185°C , dan 190°C , sesuai rentang pemadatan optimum yang digunakan dalam penelitian terdahulu S Arifin et al, (2024). Suhu di luar rentang ini tidak dianalisis.
2. Bahan utama yang digunakan meliputi aspal Pen 60/70, agregat sesuai spesifikasi Bina Marga, nanosilika tipe Aerosil R972, serta bakteri *E. coli* dengan konsentrasi bakteri 10^3 cells/mL dan konsentrasi nanosilika 5% (dari berat aspal) yang dibuat tetap pada seluruh variasi pengujian.
3. Metode pembuatan sampel dibatasi pada proses *mixing*–kompaksi, aplikasi nanosilika menggunakan teknik *mixing*, dan aplikasi bakteri menggunakan teknik surface smear setelah sampel mencapai suhu aman ($<40^\circ\text{C}$). Proses inkubasi dilakukan pada kondisi terkontrol tanpa variasi lingkungan tambahan.

4. Karakterisasi campuran aspal dibatasi pada pengujian Marshall, evaluasi sifat hidrofobik, serta analisis kemampuan awal self-healing, dilengkapi dengan karakterisasi material menggunakan XRD, FTIR, dan FESEM. Pengujian lanjutan seperti *rutting*, *fatigue*, dan durabilitas jangka panjang tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi dan batasan masalah, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur kompaksi tinggi terhadap performa mekanik aspal hibrida hidrofobik dan *self-healing* berbasis *E. coli*?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur kompaksi terhadap sifat hidrofobik permukaan aspal hibrida berdasarkan pengukuran sudut kontak *Self Healing* dengan CCR?
3. Bagaimana perubahan gugus fungsi dan interaksi kimia pada aspal hibrida akibat variasi temperatur kompaksi berdasarkan hasil karakterisasi FTIR?
4. Bagaimana perubahan struktur kristalin dan fase mineral pada aspal hibrida akibat variasi temperatur kompaksi berdasarkan hasil karakterisasi XRD?
5. Bagaimana perubahan morfologi permukaan dan struktur mikro aspal hibrida akibat variasi temperatur kompaksi berdasarkan hasil karakterisasi FESEM?

6. Temperatur kompaksi berapakah yang menghasilkan keseimbangan optimum antara performa mekanik, sifat hidrofobik, dan kestabilan struktur mikro pada aspal hibrida?

E. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukan penelitian ini sebagai berikut

1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur kompaksi tinggi terhadap kinerja mekanik aspal hibrida hidrofobik dan self-healing berbasis *E. coli* melalui pengujian Marshall.
2. Mengevaluasi perubahan sifat hidrofobik permukaan aspal hibrida pada variasi temperatur kompaksi berdasarkan pengukuran sudut kontak (*contact angle*).
3. Mengidentifikasi perubahan struktur kristalin dan fase mineral pada aspal hibrida menggunakan karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD).
4. Menganalisis gugus fungsi dan interaksi kimia pada aspal hibrida menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).
5. Mengkaji perubahan morfologi permukaan dan struktur mikro aspal hibrida akibat variasi temperatur kompaksi menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM).
6. Menentukan temperatur kompaksi optimum yang mampu memberikan keseimbangan terbaik antara performa mekanik, sifat hidrofobik, dan kestabilan struktur mikro pada aspal hibrida.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi Penulis, sebagai syarat untuk menyelesaikan program studi S1 Fisika.
2. Bagi industri, Penelitian ini memberikan alternatif material aspal yang lebih tahan suhu dan hemat biaya pemeliharaan melalui teknologi aspal hibrida hidrofobik dan *self-healing* berbasis mikroorganisme.
3. Bagi pembaca umum, Penelitian ini bermanfaat bagi masyarakat melalui tersedianya infrastruktur jalan yang lebih aman, awet, dan ramah lingkungan sehingga mengurangi risiko kecelakaan dan kerusakan jalan.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh temperatur kompaksi tinggi terhadap kinerja aspal hibrida hidrofobik dan self-healing berbasis *E.coli*, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi temperatur kompaksi berpengaruh terhadap performa mekanik aspal hibrida hidrofobik dan self-healing berbasis *E. coli*. Nilai stabilitas Marshall meningkat dari temperatur 180°C hingga mencapai kondisi optimum pada 185°C sebesar 1458 kg, kemudian menurun pada temperatur 190°C sebesar 1401 kg. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur kompaksi mempengaruhi viskositas binder, densifikasi campuran, dan kekuatan ikatan agregat–aspal.
2. Temperatur kompaksi mempengaruhi sifat hidrofobik permukaan aspal hibrida. Nilai sudut kontak meningkat seiring kenaikan temperatur kompaksi dan mencapai nilai tertinggi sebesar 136,72° pada temperatur 190°C. Peningkatan sudut kontak menunjukkan bahwa distribusi nanosilika pada permukaan aspal menjadi lebih homogen sehingga sifat hidrofobik campuran meningkat.
3. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi O–H, C–H, CO₃²⁻, dan Si–O yang mengindikasikan keberadaan matriks aspal, nanosilika, dan biomineral CaCO₃ pada campuran aspal hibrida. Temperatur kompaksi mempengaruhi kestabilan dan intensitas serapan gugus fungsi, di mana temperatur 185°C menunjukkan pola spektrum yang lebih stabil dan homogen dibandingkan temperatur lainnya.

4. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan adanya fase SiO_2 dan CaCO_3 pada seluruh variasi temperatur kompaksi. Keberadaan fase CaCO_3 menunjukkan terjadinya proses biomineralisasi oleh bakteri *E. coli*, sedangkan fase SiO_2 menunjukkan keberadaan nanosilika pada matriks aspal. Temperatur kompaksi 185°C menghasilkan pola difraksi yang lebih stabil dan lebih teratur dibandingkan temperatur lainnya.
5. Hasil karakterisasi FESEM menunjukkan bahwa variasi temperatur kompaksi mempengaruhi morfologi permukaan dan struktur mikro aspal hibrida. Peningkatan temperatur kompaksi hingga 185°C menghasilkan permukaan yang lebih rapat, homogen, serta jumlah mikrovoid yang lebih sedikit akibat proses densifikasi dan distribusi biomineral CaCO_3 yang lebih merata. Pada temperatur 190°C mulai terlihat ketidakaturan morfologi permukaan yang mengindikasikan penurunan kestabilan struktur mikro akibat temperatur yang terlalu tinggi
6. Temperatur kompaksi 185°C merupakan temperatur optimum yang memberikan keseimbangan terbaik antara performa mekanik, sifat hidrofobik, kemampuan self-healing, dan kestabilan struktur mikro pada aspal hibrida berbasis *E. coli*.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian *self-healing* secara langsung menggunakan metode *crack closure*, *healing index*, atau *recovery*

test sehingga mekanisme penyembuhan retakan dapat dianalisis secara lebih kuantitatif.

2. Perlu dilakukan pengujian tambahan seperti rutting test, fatigue test, dan durabilitas jangka panjang untuk mengevaluasi performa aspal hibrida pada kondisi pembebanan dan lingkungan yang lebih realistis.
3. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan karakterisasi biologis tambahan untuk memastikan aktivitas dan viabilitas mikroorganisme setelah proses aplikasi pada permukaan aspal.
4. Optimasi konsentrasi nanosilika dan mikroorganisme perlu dilakukan untuk memperoleh kombinasi material yang memberikan performa mekanik, sifat hidrofobik, dan kemampuan self-healing yang lebih optimal.
5. Penelitian selanjutnya juga disarankan mengkaji pengaruh variasi kondisi lingkungan seperti kelembapan, paparan UV, dan siklus temperatur terhadap kestabilan aspal hibrida dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Mansoori, T., Micaelo, R., Artamendi, I., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2017). Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 155, 1091–1100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137>
- Behnood, A., & Modiri Gharehveran, M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E., Aboul-enein, H. Y., Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E., Aboul-enein, H. Y., Bunaciu, A. A., & S, E. G. U. (2015). *Critical Reviews in Analytical Chemistry X-Ray Diffraction : Instrumentation and Applications X-Ray Diffraction : Instrumentation and Applications*. 8347. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Chen, M., Javilla, B., Hong, W., Pan, C., Riara, M., Mo, L., & Guo, M. (2019). *Rheological and Interaction Analysis of Asphalt*. <https://doi.org/10.3390/ma12010128>
- Cheraghian, G., & Wistuba, M. P. (2020). Ultraviolet aging study on bitumen modified by a composite of clay and fumed silica nanoparticles. *Scientific Reports*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68007-0>
- Cheraghian, G., Wistuba, M. P., Kiani, S., Barron, A. R., & Behnood, A. (2021). Rheological, physicochemical, and microstructural properties of asphalt binder modified by fumed silica nanoparticles. *Scientific Reports*, 11(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90620-w>
- Concha, J. L., Arteaga-Pérez, L. E., Gonzalez-Torre, I., Liu, Q., Norambuena-Contreras, J., Abadeen, A. Z. U., Hussain, A., Kumar, V. S., Murali, G., Vatin, N. I., Riaz, H., Norambuena-Contreras, J., Concha, J. L., Valdes-Vidal, G., Wood, C., Wang, H., Liu, Q., Wu, J., Wan, P., ... Çeloğlu, M. E. (2022). Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperatur performance. *Materials*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/polym15010199>
- Dai, Y., Liang, W., Ye, D., Xie, S., Sang, Y., & Li, D. (2023). *Modi fi cation e ff*

ects of nanosilica on asphalt binders : A review.

- Dubreuil, J. D., Isaacson, R. E., & Schifferli, D. M. (2002). *Animal enterotoxigenic Escherichia coli*. EcoSal Plus.
- Fan, L., Zheng, J., Peng, S., Xun, Z., & Chen, G. (2023). Experimental Investigation on the Influence of Crack Width of Asphalt Concrete on the Repair Effect of Microbially Induced Calcite Precipitation. *Materials*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/ma16093576>
- Guo, Wei et al. (2018). *Evaluating the Effect of Hydrophobic Nanosilica on the Viscoelasticity Property of Asphalt and*. <https://doi.org/10.3390/ma11112328>
- Hamed, G. H., Shabani, A., & Safargar, Y. (2020). Investigating the effect of hydrophobic additives in moisture damage reduction of asphalt mixtures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(3), 702–712. <https://doi.org/10.3311/PPci.15457>
- Harti, A. S. (2015). *Mikrobiologi Kesehatan*. Yogyakarta: ANDI.
- Hassan, F. S. (2024). *Enhancement of the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures Modified by Nano Clay and Crumb Rubber*. 14(5), 17438–17444.
- Hidayati, N., dkk. (2016). Karakteristik morfologi dan pertumbuhan *Escherichia coli*. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 8(2), 45–52.
- Hou, G., Xue, Y., Li, Z., & Lu, W. (2024). Rheological Properties of Silica-Fume-Modified Bioasphalt and Road Performance of Mixtures. *Materials*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ma17092090>
- Hu, X., Chen, X., Yu, J., Cheng, G., Yuan, Y., & Zhang, L. (2025). Physical Properties and Rheological Characteristics of Cigarette Butt-Modified Asphalt Binders. *Coatings*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/coatings15020170>
- Islam, M. M., Hoque, N., Islam, M., & Ibney Gias, I. (2022). An Experimental Study on the Strength and Crack Healing Performance of E. coli Bacteria-Induced Microbial Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3060230>
- Jawetz, E., Melnick, J. L., & Adelberg, E. A. (2005). *Mikrobiologi Kedokteran* (23rd ed.). Jakarta: EGC.
- Jennings, M. E., Breley, G. J., Drabik, A., Tantisuwanno, C., Dhinojwala, M. A., Kanaparthi, A., & Barton, H. A. (2024). Toward Self-Healing Coatings:

- Bacterial Survival and Calcium Carbonate Precipitation in Acrylic and Styrene–Acrylic Model Paint Films. *Buildings*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/buildings14051202>
- Jr, S. L., Freitas, E., Branco, V. C., & Costa, M. F. M. (2020). *Superhydrophobic Asphalt Pavements : Surface Improvement*. 12012, 3–4.
- Karsinah. (2011). *Mikrobiologi Kedokteran*. Jakarta: Binarupa Aksara.
- Kowoll, T., Müller, E., Fritsch-Decker, S., Hettler, S., Störmer, H., Weiss, C., & Gerthsen, D. (2017). Contrast of backscattered electron SEM images of nanoparticles on substrates with complex structure. *Scanning*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4907457>
- Li, Z., Wang, H., Wan, P., Liu, Q., Xu, S., Jiang, J., Fan, L., & Tu, L. (2023). *Healing Evaluation of Asphalt Mixtures with Polymer Capsules Containing Rejuvenator under Different Water Solutions*. *Healing Evaluation of Asphalt Mixtures with Polymer Capsules Containing Rejuvenator under Different Water Solutions*. <https://doi.org/10.3390/su152115258>
- Liu, Z., Liu, Z., Huang, Y., & Cao, Y. (2024). Determining the Compaction Temperatur of Warm-Mix Anti-Rutting Asphalt Mixture. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/app142311042>
- Manning, S. D. (2010). *Genomic Perspectives on the Evolution and Spread of Bacterial Pathogens*. Washington DC: ASM Press.
- Manoharan, K., & Bhattacharya, S. (2019). Superhydrophobic surfaces review: Functional application, fabrication techniques and limitations. *Journal of Micromanufacturing*, 2(1), 59–78. <https://doi.org/10.1177/2516598419836345>
- Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Spectroscopy. In *Membrane Characterization*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2>
- Norambuena-Contreras, J., Concha, J. L., Valdes-Vidal, G., & Wood, C. (2024). Optimised biopolymer-based capsules for enhancing the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 57(10), 1–21. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02508-6>
- Octriany, Y., & Ratnawulan, R. (2023). Effect E. coli Bacteria Concentration as

- Self Healing on Compressive Strength and Hydrophobic Properties on Micro Cracks of Concrete. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(SpecialIssue), 989–997. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9ispecialissue.5911>
- Prescott, L. M. (2008). *Microbiology* (7th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Priyom, S. N., Zawad, M. F. S., Rahman, M. A., & Islam, M. M. (2022). Journal of Civil Engineering Education. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 1, 17–27.
- Radji, M. (2011). *Buku Ajar Mikrobiologi: Panduan Mahasiswa Farmasi dan Kedokteran*. Jakarta: EGC.
- S Arifin et al. (2024). *The effect of asphalt heating temperatur on stability marshall asphalt concrete mixture added pet plastic waste The effect of asphalt heating temperatur on stability marshall asphalt concrete mixture added pet plastic waste*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1355/1/012047>
- Shu, B., Zhou, M., Yang, T., Li, Y., Ma, Y., Liu, K., Bao, S., Barbieri, D. M., & Wu, S. (2021). The properties of different healing agents considering the micro-self-healing process of asphalt with encapsulations. *Materials*, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma14010016>
- Sistra, Mawid Dwi et al. (2016). *ANALISIS KARAKTERISTIK MODIFIKASI ASPAL PENETRASI 60/70 DENGAN ETHYLENE VINYL ACETATE (EVA)*. 120–127.
- Songer, J. G., & Post, K. W. (2005). *Veterinary Microbiology: Bacterial and Fungal Agents of Animal Disease*. St. Louis: Elsevier Saunders.
- Sun, L., Xin, X., & Ren, J. (2017). Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperatur performance. *Construction and Building Materials*, 133, 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.073>
- Whittam, T. S., & McGraw, E. A. (2011). *Pathogenesis and evolution of virulence in Escherichia coli*. *Clinical Microbiology Reviews*, 24(2), 268–298.
- Xu, S., Liu, X., Tabaković, A., & Schlangen, E. (2021). Experimental investigation of the performance of a hybrid self-healing system in porous asphalt under fatigue loadings. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ma14123415>
- Yan, Tianhao et al. (2022). *Reducing Compaction Temperatur of Asphalt Mixtures*

by GNP Modification and Aggregate Packing Optimization.

- Yu, L., Ma, K., Yin, H., Zhou, C., He, W., Yu, G., Zhang, Q., Liu, Q., & Zhao, Y. (2024). Superhydrophobic Coating Based on Nano-Silica Modification for Antifog Application of Partition Glass. *Coatings*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/coatings14111375>
- Zhang, Z., Sun, J., Jia, M., Qi, B., Zhang, H., Lv, W., Mao, Z., Chang, P., Peng, J., & Liu, Y. (2020). Study on a thermosetting polyurethane modified asphalt suiTabel for bridge deck pavements: Formula and properties. *Construction and Building Materials*, 241, 118122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118122>