

**PENGARUH KOMPOSISI NANOSILIKA TERHADAP SIFAT
SELF-HEALING DAN HIDROFOBİK ASPAL HIBRIDA
BERBASIS MIKROORGANISME**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains



Oleh :

MUHAMAD KHALID KHADAFI

NIM.21034102/21

PRODI FISIKA NK

DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI PADANG

2026

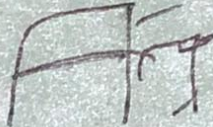
PERSETUJUAN SKRIPSI

PENGARUH KOMPOSISI NANOSILIKA TERHADAP SIFAT *SELF-HEALING* DAN HIDROFOBIK ASPAL HIBRIDABERBASIS MIKROORGANISME

Nama : Muhamad Khalid Khadafi
NIM : 21034102/2021
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, 22 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

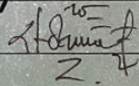
Nama : Muhamad Khalid Khadafi
NIM : 21034102
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

**PENGARUH KOMPOSISI NANOSILIKA TERHADAP
SIFAT *SELF-HEALING* DAN HIDROFOBİK ASPAL
HIBRIDA BERBASIS MIKROORGANISME**

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

Padang, 22 Mei 2026

Tim Penguji

	Nama	Tanda tangan
Ketua	: Prof. Dr. Ratnawulan, M.Si	
Anggota	: Dr. Riri Jonuarti, S.Pd, M.Si	
Anggota	: Syafri, S.Pd., M.Si.	

SURAT PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Khalid Khadafi
NIM : 21034102
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

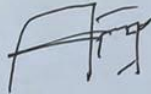
Dengan ini menyatakan bahwa, skripsi saya dengan judul "Pengaruh Komposisi Nanosilika terhadap Sifat *Self-Healing* dan Hidrofobik Aspal Hibrida Berbasis Mikroorganisme" adalah benar merupakan karya sendiri, bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya yang ditulis dan diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang lazim.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab sebagai anggota masyarakat ilmiah.

Padang, 22 Mei 2026

Diketahui oleh,
Ketua Departemen Fisika

Saya yang menyatakan,



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



Muhamad Khalid Khadafi
NIM. 21034102

PENGARUH KOMPOSISI NANOSILIKA TERHADAP SIFAT SELF-HEALING DAN HIDROFOBİK ASPAL HIBRIDA BERBASIS MIKROORGANISME

ABSTRAK

Kerusakan jalan akibat retakan dan penetrasi air masih menjadi permasalahan utama pada aspal. Aspal memiliki kemampuan *self-healing* alami yang terbatas serta mudah mengalami kerusakan akibat kelembapan sehingga umur layan jalan menjadi lebih pendek. Salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas aspal adalah dengan memanfaatkan nanosilika dan metode *Microbially Induced Calcium Precipitation* (MICP) berbasis bakteri *Escherichia coli*. Nanosilika berperan dalam meningkatkan sifat hidrofobik dan memperkuat struktur aspal, sedangkan bakteri *E. coli* membantu pembentukan endapan CaCO_3 untuk menutup retakan kecil pada permukaan aspal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi nanosilika terhadap sifat *self-healing* dan hidrofobik aspal hibrida berbasis mikroorganisme.

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan variasi nanosilika sebesar 0%, 3%, 5%, dan 9% dari berat aspal. Sampel dibuat menggunakan metode pencampuran panas dengan teknik *blending* dan dipadatkan menggunakan metode Marshall standar SNI 06-2489-1991. Bakteri *Escherichia coli* diaplikasikan pada permukaan aspal menggunakan metode *smear coating* untuk mendukung proses MICP. Pengujian dilakukan melalui uji *self-healing* menggunakan parameter *Crack Closure Ratio* (CCR), pengukuran sudut kontak menggunakan software ImageJ, serta karakterisasi material menggunakan FTIR, FESEM, dan XRD untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi, morfologi permukaan, dan pembentukan kristal CaCO_3 .

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanosilika memberikan pengaruh terhadap peningkatan sifat *self-healing* dan hidrofobik aspal hibrida. Nilai CCR meningkat dari 18,75% pada nanosilika 0% menjadi 52,05% pada 3% dan mencapai nilai optimum sebesar 67,42% pada nanosilika 5%, kemudian menurun menjadi 38,24% pada nanosilika 9%. Sementara itu, nilai sudut kontak meningkat seiring bertambahnya kadar nanosilika, yaitu dari $76,555 \pm 7,074^\circ$ pada nanosilika 0% menjadi $88,986 \pm 2,685^\circ$ pada 3%, $98,151 \pm 2,979^\circ$ pada 5%, dan $107,833 \pm 5,446^\circ$ pada 9%. Peningkatan sudut kontak menunjukkan bahwa permukaan aspal menjadi lebih hidrofobik dan lebih mampu menolak air. Karakterisasi FTIR, FESEM, dan XRD juga menunjukkan adanya pembentukan endapan CaCO_3 yang mengindikasikan terjadinya proses biomineralisasi melalui mekanisme MICP pada aspal hibrida.

Kata kunci: nanosilika, aspal hibrida, *self-healing*, hidrofobik, sudut kontak, *Escherichia coli*, MICP, CaCO_3 .

THE EFFECT OF NANOSILICA COMPOSITION ON THE SELF-HEALING AND HYDROPHOBIC PROPERTIES OF MICROORGANISM-BASED HYBRID ASPHALT

ABSTRACT

Road damage caused by cracking and water penetration remains one of the main problems in asphalt pavements. Asphalt has limited natural self-healing ability and is easily damaged by moisture, resulting in a shorter service life. One effort to improve asphalt quality is through the utilization of nanosilica and the *Microbially Induced Calcium Precipitation* (MICP) method based on *Escherichia coli* bacteria. Nanosilica plays a role in improving hydrophobic properties and strengthening the asphalt structure, while *E. coli* bacteria assist the formation of CaCO_3 precipitates to close microcracks on the asphalt surface. This study aims to analyze the effect of nanosilica composition variations on the self-healing and hydrophobic properties of microorganism-based hybrid asphalt.

This study was an experimental laboratory research using nanosilica variations of 0%, 3%, 5%, and 9% by asphalt weight. The samples were prepared using a hot mixing method with a blending technique and compacted using the Marshall method according to SNI 06-2489-1991 standards. *Escherichia coli* bacteria were applied to the asphalt surface using the *smear coating* method to support the MICP process. The tests included self-healing analysis using the *Crack Closure Ratio* (CCR) parameter, contact angle measurements using ImageJ software, and material characterization using FTIR, FESEM, and XRD to identify functional group changes, surface morphology, and CaCO_3 crystal formation.

The results showed that the addition of nanosilica influenced the improvement of self-healing and hydrophobic properties of hybrid asphalt. The CCR value increased from 18.75% at 0% nanosilica to 52.05% at 3%, reaching an optimum value of 67.42% at 5% nanosilica, then decreased to 38.24% at 9% nanosilica. Meanwhile, the contact angle value increased with increasing nanosilica content, from $76.555 \pm 7.074^\circ$ at 0% nanosilica to $88.986 \pm 2.685^\circ$ at 3%, $98.151 \pm 2.979^\circ$ at 5%, and $107.833 \pm 5.446^\circ$ at 9%. The increase in contact angle indicates that the asphalt surface became more hydrophobic and more resistant to water penetration. FTIR, FESEM, and XRD characterizations also showed the formation of CaCO_3 precipitates, indicating the occurrence of biomineralization through the MICP mechanism in hybrid asphalt.

Keywords: nanosilica, hybrid asphalt, self-healing, hydrophobic, contact angle, *Escherichia coli*, MICP, CaCO_3 .

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur peneliti persembahkan kehadirat Allah SWT, yang selalu memberikan limpahan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Shalawat beriringan salam tak lupa kita curahkan kepada Nabi besar Muhammad SAW. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika dengan judul “Pengaruh Komposisi Nanosilika terhadap Sifat *Self-Healing* dan Hidrofobik Aspal Hibrida Berbasis Mikroorganisme”.

Peneliti menyadari tanpa adanya bantuan baik moril dan materi dari berbagai pihak maka penelitian ini tidak akan terwujud, karena itu pada kesempatan ini peneliti mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Ibu Prof. Dr. Ratnawulan., M.Si selaku Pembimbing, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing dan mengarahkan peneliti dalam menyelesaikan Skripsi ini. Pada kesempatan ini peneliti menyampaikan terima kasih setulus-tulusnya kepada :

1. Kedua Orang Tua yang selalu memberikan kasih sayang, doa, nasihat, serta kesabarannya yang luar biasa dalam setiap langkah hidup peneliti, yang merupakan anugerah terbesar dalam hidup. Peneliti berharap dapat menjadi anak yang dapat membanggakan.
2. Ibu Prof. Dr. Ratnawulan., M.Si selaku Dosen Pembimbing.
3. Ibu Dr. Riri Jonuarti, S.Pd., M.Si selaku Dosen Penguji I
4. Bapak Syafri, S.Pd., M.Si selaku Dosen Penguji II
5. Bapak Dr. Harman Amir, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika

6. Seluruh Staff administrasi Program Studi Fisika, Laboran Departemen Fisika, Laboran Departemen Kimia, Laboran Departemen Biologi dan Laboran Dinas Bina Marga Cipta Karya dan Tata Ruang.

Peneliti menyadari masih banyak keterbatasan dan kekurangan dalam penulisan Skripsi ini. Maka dari itu peneliti mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna perbaikan penulisan Skripsi ini ke depannya.

Padang, 17 Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	4
C. Batasan Masalah	5
D. Rumusan Masalah	6
E. Tujuan Penelitian	7
F. Manfaat Penelitian	7
BAB II KAJIAN PUSTAKA	9
A. Aspal dan Karakteristiknya	9
1. Pengertian Aspal	9
2. Komposisi Campuran Aspal	9
3. Kelemahan Aspal	10
B. Nanosilika (SiO_2) sebagai Filler pada Aspal	11
1. Pengertian Nanosilika	11
2. Mekanisme Interaksi Nanosilika dengan Aspal	11
3. Pengaruh Nanosilika terhadap Sifat Mekanik Aspal	12
4. Pengaruh Nanosilika terhadap Hidrofobisitas Aspal	12
5. Pengaruh Nanosilika terhadap Kemampuan <i>Self-Healing</i> Aspal	13
6. Pengaruh Variasi Komposisi Nanosilika (0%, 3%, 5%, 9%) terhadap Performa Aspal	13
7. Jenis Nanosilika yang Digunakan dalam Penelitian	15
C. <i>Microbially Induced Calcium Precipitation</i> (MICP) sebagai Mekanisme <i>Self-Healing</i>	16
1. Konsep Dasar MICP	16

2.	Peran CaCl_2 dan Urea dalam Proses MICP	17
3.	Produk MICP: Kalsium Karbonat (CaCO_3)	17
D.	<i>Escherichia Coli</i> sebagai Agen <i>Self-Healing</i> Berbasis MICP	18
1.	Karakteristik Umum <i>Escherichia Coli</i>	18
2.	Kemampuan <i>E. coli</i> dalam menghasilkan lapisan pelindung dan membentuk lapisan bakteri	20
3.	Peran <i>E. coli</i> dalam Proses MICP	20
4.	Kesesuaian <i>E. coli</i> dengan Lingkungan Aspal	21
5.	Interaksi <i>E. coli</i> dengan Nanosilika pada Campuran Aspal	22
6.	Metode Aplikasi <i>Self-Healing</i> Berbasis <i>E. coli</i>	23
E.	Hidrofobisitas pada Aspal	24
1.	Konsep Dasar Hidrofobisitas	24
2.	Teori Sudut Kontak	25
3.	Peran Nanosilika dalam Meningkatkan Hidrofobisitas	26
4.	Peran Hidrofobisitas dalam Mendukung <i>Self-Healing</i> Berbasis <i>E. coli</i>	26
F.	Alat Karakterisasi	27
1.	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	27
2.	Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)	28
3.	X-Ray Diffraction (XRD)	29
BAB III METODE PENELITIAN		31
A.	Jenis Penelitian	31
B.	Tempat dan Waktu Penelitian	31
C.	Variabel Penelitian	32
1.	Variabel Bebas	32
2.	Variabel Kontrol	32
3.	Variabel Terikat	32
D.	Instrumen Penelitian	33
1.	Bahan	33
2.	Alat	34
E.	Prosedur Penelitian	37
1.	Tahap Persiapan	37

2.	Tahap Preparasi	37
3.	Tahap Pembuatan Benda Uji Aspal dengan Standar SNI 06-2489-1991 dan Pengaplikasian Nanosilika dengan Metode <i>Blending</i>	39
4.	Tahap Pengaplikasian Bakteri <i>Escherichia Coli</i> pada Permukaan Aspal ..	41
5.	Proses <i>Microbially Induced Calcium Precipitation</i> (MICP) dalam ruangan dengan suhu terkontrol	42
6.	Tahap pengujian Marshall dan Stabilitas Aspal	42
7.	Tahap pengujian Hidrofobik Aspal	43
8.	Tahap pengujian <i>Self-healing</i> Aspal.....	44
F.	Teknik Pengumpulan Data	44
G.	Teknik Analisis Data.....	45
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		47
A.	Hasil Penelitian	47
1.	Deskripsi Data	47
2.	Analisis Data	64
B.	Pembahasan.....	84
BAB V PENUTUP.....		93
A.	Kesimpulan	93
B.	Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA		97

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Self-healing (CCR)	48
Tabel 2 Data Pengukuran sudut Kontak dengan Nanosilika 0%	52
Tabel 3 Data Pengukuran sudut Kontak dengan Nanosilika 3%	53
Tabel 4 Data Pengukuran sudut Kontak dengan Nanosilika 5%	53
Tabel 5 Data Pengukuran sudut Kontak dengan Nanosilika 9%	54
Tabel 6 Data Stabilitas, Flow, dan Marshall	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Aspal.....	9
Gambar 2 Komposisi Campuran Aspal	9
Gambar 3 Nanosilika Aerosil R972	15
Gambar 4 Proses Pembentukan Endapan CaCO_3	16
Gambar 5 <i>Self-Healing</i> Beton	16
Gambar 6 Bakteri <i>Escherichia coli</i>	18
Gambar 7 Tetesan Air pada Permukaan.....	24
Gambar 8 Sudut Kontak dengan Hidrofobisitas Berbeda	25
Gambar 9 Perhitungan Kadar Aspal	38
Gambar 10 <i>Self-Healing</i> Aspal Nanosilika 0%.....	49
Gambar 11 <i>Self-Healing</i> Aspal Nanosilika 3%.....	49
Gambar 12 <i>Self-Healing</i> Aspal Nanosilika 5%.....	50
Gambar 13 <i>Self-Healing</i> Aspal Nanosilika 9%	50
Gambar 14 Sudut Kontak Aspal Hibrida dengan Nanosilika 0%	52
Gambar 15 Sudut Kontak Aspal Hibrida dengan Nanosilika 3%	52
Gambar 16 Sudut Kontak Aspal Hibrida dengan Nanosilika 5%	53
Gambar 17 Sudut Kontak Aspal Hibrida dengan Nanosilika 9%	54
Gambar 18 Spektrum Nanosilika 0%.....	55
Gambar 19 Spektrum Nanosilika 3%.....	56
Gambar 20 Spektrum Nanosilika 5%.....	56
Gambar 21 Spektrum Nanosilika 9%.....	57

Gambar 22 Citra Fesem Sampel Nanosilika 0%.....	58
Gambar 23 Citra Fesem Sampel Nanosilika 3%.....	58
Gambar 24 Citra Fesem Sampel Nanosilika 5%.....	58
Gambar 25 Citra Fesem Sampel Nanosilika 9%.....	59
Gambar 26 Difraktogram Nanosilika 0%	60
Gambar 27 Difraktogram Nanosilika 3%	60
Gambar 28 Difraktogram Nanosilika 5%	61
Gambar 29 Difraktogram Nanosilika 9%	62
Gambar 30 Spektrum Aspal Hibrida dengan Variasi Nanosilika	68
Gambar 31 Grafik. Data EDS FESEM (a). Nanosilika 0%, (b) Nanosilika 3%, (c) Nanosilika 5% dan (d) Nanosilika 9%.....	71
Gambar 32 Difraktogram XRD Aspal Hibrida dengan Variasi Nanosilika.....	75
Gambar 33 Grafik Hubungan Nanosilika dengan Stabilitas	79
Gambar 34 Grafik Hubungan Nanosilika dengan Flow.....	80
Gambar 35 Grafik (a) Hubungan Nanosilika dengan VFB, (b) Hubungan Nanosilika dengan VIM.	82

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Jalan merupakan infrastruktur penting yang mendukung kelancaran transportasi dalam menghubungkan antarwilayah. Namun, aspal biasa yang kita gunakan masih memiliki beberapa masalah, contohnya cepat retak, permukaan jalan yang bergelombang, jalan yang berlubang karena tekanan dari transportasi dan karena terkena air berulang kali setiap tahunnya. Kondisi ini menyebabkan jalan menjadi lebih cepat rusak dan untuk memperbaikinya membutuhkan biaya yang besar serta waktu perbaikan yang lama. Secara umum, aspal tersusun atas dua bahan utama, yaitu asphaltene dan maltene. Untuk maltene mudah bercampur dengan air, sehingga air lebih mudah masuk ke celah-celah kecil pada aspal. Hal ini dapat menyebabkan lapisan aspal terlepas dari batuan penyusunnya dan membuat ikatan antara aspal dan agregat menjadi lebih lemah (Ahmed, Hossain dan Tarefder, 2019). Selain itu, kemampuan *self-healing* alami pada aspal masih terbatas karena proses pemulihannya berjalan lambat pada suhu normal. Akibatnya, retakan kecil yang tidak segera tertutup akan semakin besar dan menyebabkan kerusakan yang membutuhkan biaya perbaikan yang mahal.

Berbagai cara untuk meningkatkan kualitas aspal telah dikembangkan, baik melalui perubahan bahan, proses, maupun teknik pencampuran. Dalam beberapa tahun terakhir, metode berbasis biologi mulai banyak diperhatikan karena dianggap lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Metode *Microbially Induced Calcium*

Precipitation (MICP) merupakan salah satu cara yang cukup menjanjikan, yaitu dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk membantu membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui proses alami yang terjadi pada mikroorganisme tersebut. Endapan CaCO_3 yang terbentuk bisa mengisi retakan-retakan kecil pada aspal secara alami, sehingga membuat aspal menjadi lebih kuat tanpa perlu perbaikan menggunakan alat ataupun cara lain dari luar (Cheng dan Cord-Ruwisch, 2022). Bakteri *Escherichia coli*, dipilih karena mampu bertahan hidup pada lingkungan aspal yang minim oksigen dan mengandung banyak senyawa hidrokarbon, sehingga cocok digunakan dalam penelitian ini (Monk et al., 2023).

Nanosilika (SiO_2) merupakan nanomaterial yang telah terbukti efektif meningkatkan performa aspal melalui berbagai mekanisme. Ukuran partikelnya yang sangat kecil (1–100 nm) dan luas permukaan spesifik yang tinggi (100–400 m^2/g) memungkinkan nanosilika mengisi pori-pori kecil dalam aspal, sehingga struktur aspal menjadi lebih kuat dan lebih tahan terhadap air (Dai, Li dan Zhang, 2023). Nanosilika jenis Aerosil R972 yang digunakan dalam penelitian ini memiliki sifat lebih tahan terhadap air dibandingkan nanosilika biasa, sehingga lebih efektif dalam melindungi aspal dari kerusakan akibat air. Selain itu, partikel nanosilika membuat tekstur mikro pada permukaan aspal, sehingga berpotensi meningkatkan hidrofobisitas melalui mekanisme Cassie–Baxter, proses yang terjadi karena adanya ruang udara kecil diantara partikel nanosilika yang mengurangi kontak langsung antara air dengan permukaan aspal (Zhang, Li dan Wang, 2024).

Penggabungan nanosilika dan metode MICP berbasis *E. coli* dalam satu sistem aspal hibrida memberikan kombinasi baru yang belum banyak diteliti sebelumnya.

Nanosilika memiliki dua fungsi utama, yaitu memperkuat struktur aspal agar retakan kecil tidak cepat membesar, serta menjadi tempat menempel bagi bakteri untuk berkembang. Setelah menempel, bakteri *E. coli* membentuk lapisan alami dan membantu menghasilkan endapan CaCO_3 dari campuran CaCl_2 dan urea. Endapan tersebut kemudian mengisi retakan kecil pada aspal secara alami (Li et al., 2021). Hidrofobisitas yang ditingkatkan oleh nanosilika juga membantu melindungi lapisan dan endapan CaCO_3 dari kerusakan akibat air, sehingga proses *self-healing* pada aspal dapat bertahan lebih lama. Dengan begitu, sistem gabungan (hibrida) ini mampu menciptakan proses perbaikan aspal yang lebih lengkap dibandingkan metode tunggal lainnya.

Walaupun penelitian tentang penggunaan nanosilika pada aspal sudah cukup banyak dilakukan (Mashaan, 2022; Khan, Ali dan Mashaan, 2023; Mohammed, Al-Mansob dan Ibrahim, 2023), serta penelitian MICP pada beton juga telah menunjukkan hasil yang baik (Achal, Pan dan Özyurt, 2021), hingga saat ini belum banyak penelitian yang menggabungkan kedua metode tersebut dalam aspal. Selain itu, variasi komposisi nanosilika (0%, 3%, 5%, dan 9%) pada penelitian terdahulu hanya dipilih berdasarkan kekuatan aspal, tanpa mempertimbangkan dampaknya terhadap kemampuan bakteri untuk bertahan hidup dan bekerja dalam proses MICP. Padahal, jumlah nanosilika yang terlalu banyak dapat menghambat pergerakan bakteri, sedangkan jumlah yang terlalu sedikit tidak cukup baik untuk membantu bakteri bekerja dengan efektif. Selain itu, penggunaan model Cassie–Baxter dan Wenzel untuk menjelaskan perubahan hidrofobisitas pada sistem hibrida ini juga belum pernah dilaporkan sebelumnya (Mądry dan Nowicki, 2021).

Berdasarkan kekurangan penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan untuk menguji pengaruh variasi komposisi nanosilika (0%, 3%, 5%, 9%) terhadap sifat *self-healing* dan hidrofobisitas aspal hibrida berbasis *E. coli* dan metode MICP. Penelitian ini dievaluasi secara menyeluruh melalui pengujian mekanik Marshall, pengujian *self-healing*, pengukuran sudut kontak menggunakan ImageJ, serta karakterisasi struktur material menggunakan FTIR, FESEM, dan XRD. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menemukan jumlah nanosilika yang paling baik dalam menggabungkan penguatan aspal dan proses perbaikan alami berbasis bakteri *E. coli*. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan material jalan yang lebih tahan air, lebih awet, dan memiliki umur pakai lebih panjang.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. Aspal mudah mengalami kerusakan akibat air dan retakan kecil yang lama-kelamaan menjadi retakan besar karena kemampuan sifat hidrofobik aspal masih rendah.
2. Kemampuan *self-healing* aspal untuk memperbaiki retakan kecil aspal secara alami masih sangat terbatas karena proses pemulihannya yang berjalan lambat pada suhu normal, sehingga memerlukan metode tambahan yang lebih efektif.

3. Pengaruh variasi komposisi nanosilika (0%, 3%, 5% dan 9%) terhadap kemampuan *self-healing* berbasis MICP pada aspal hibrida berbasis *E. coli* belum pernah diteliti secara menyeluruh.
4. Pengaruh variasi komposisi nanosilika terhadap sifat hidrofobik aspal hibrida, termasuk proses yang menyebabkan air sulit menempel pada permukaan aspal, masih jarang diteliti.
5. Interaksi antara nanosilika, aspal, dan *E. coli* dalam sistem gabungan ini, termasuk pembentukan CaCO_3 melalui XRD, FTIR, dan FESEM, belum dipelajari secara menyeluruh.
6. Pengaruh variasi komposisi nanosilika terhadap kinerja mekanik aspal hibrida, khususnya nilai stabilitas, *flow* dan *Marshall*, dalam konteks sistem berbasis *E. coli* dan MICP masih belum diteliti secara mendalam.

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Komposisi nanosilika yang digunakan adalah variasi 0%, 3%, 5%, dan 9% berdasarkan berat aspal.
2. Bahan utama yang digunakan yaitu aspal Pen 60/70, agregat sesuai spesifikasi Bina Marga, nanosilika tipe Aerosil R972, serta bakteri *E. coli* dengan konsentrasi bakteri 10^3 sel/mL.
3. Metode pembuatan sampel dilakukan menggunakan metode pencampuran panas (*hot mix asphalt*) dengan teknik *blending*, yaitu nanosilika dicampurkan ke dalam aspal pada suhu $\pm 150^\circ\text{C}$ hingga homogen, kemudian

campuran dipadatkan menggunakan metode Marshall standar SNI 06-2489-1991. Aplikasi bakteri *Escherichia coli* dilakukan pada permukaan sampel menggunakan metode *smear coating* untuk mendukung proses *self-healing* berbasis MICP.

4. Parameter yang diuji melalui pengujian mekanik Marshall, pengujian *self-healing*, pengukuran sudut kontak menggunakan ImageJ, serta karakterisasi struktur material menggunakan FTIR, FESEM, dan XRD.

D. Rumusan Masalah

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

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

6. Bagaimana pengaruh variasi komposisi nanosilika terhadap kinerja mekanik aspal hibrida berbasis *E. coli* yang diukur melalui nilai stabilitas, *flow*, dan Marshall?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini:

1. Menganalisis pengaruh variasi komposisi nanosilika terhadap sifat *self-healing* aspal hibrida berbasis *E. coli* melalui mekanisme MICP.
2. Menganalisis pengaruh komposisi nanosilika terhadap sifat hidrofobik aspal hibrida melalui pengukuran sudut kontak.
3. Mengidentifikasi perubahan gugus fungsi pada permukaan aspal hibrida akibat penambahan nanosilika dan aktivitas MICP menggunakan FTIR.
4. Mengamati morfologi permukaan, distribusi nanosilika, struktur biofilm *E. coli*, dan konfirmasi visual presipitat CaCO_3 melalui FESEM.
5. Menganalisis fase kristal dan mengidentifikasi polimorf CaCO_3 produk MICP pada aspal hibrida termodifikasi nanosilika menggunakan XRD.
6. Menganalisis kinerja mekanik aspal hibrida termodifikasi nanosilika melalui menggunakan metode Marshall.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi penulis, sebagai syarat untuk menyelesaikan program studi S1 Fisika.

2. Bagi industri, penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan formulasi aspal hibrida yang lebih tahan air, memiliki kemampuan *self-healing* yang lebih baik, dan berumur layanan lebih panjang, sehingga mengurangi biaya pemeliharaan infrastruktur jalan.
3. Bagi pembaca, penelitian ini bermanfaat bagi masyarakat melalui adanya inovasi teknologi aspal terbaru.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Variasi komposisi nanosilika memberikan pengaruh terhadap kemampuan *self-healing* aspal hibrida berbasis *Escherichia coli* melalui mekanisme MICP. Nilai *Crack Closure Ratio* (CCR) meningkat dari 18,75% pada nanosilika 0% menjadi 52,05% pada nanosilika 3%, dan mencapai nilai optimum sebesar 67,42% pada nanosilika 5%. Namun, pada nanosilika 9% nilai CCR menurun menjadi 38,24%. Hasil ini menunjukkan bahwa nanosilika 5% memberikan sinergi terbaik antara penguatan struktur aspal dan proses biomineralisasi CaCO_3 oleh *E. coli* dalam mendukung mekanisme *self-healing*.
2. Variasi komposisi nanosilika berpengaruh terhadap sifat hidrofobik aspal hibrida berdasarkan hasil pengukuran sudut kontak. Nilai sudut kontak meningkat seiring bertambahnya kadar nanosilika, dari sekitar 76° pada nanosilika 0% menjadi sekitar 88° pada nanosilika 3%, meningkat menjadi sekitar 98° pada nanosilika 5%, dan mencapai lebih dari 107° pada nanosilika 9%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa nanosilika mampu meningkatkan hidrofobisitas permukaan aspal melalui pembentukan struktur mikro-kasar dan pengurangan interaksi langsung antara air dan permukaan aspal sesuai mekanisme Cassie–Baxter.

3. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya perubahan gugus fungsi pada aspal hibrida setelah penambahan nanosilika dan aktivitas MICP. Spektrum FTIR memperlihatkan keberadaan gugus Si–O–Si yang menandakan adanya nanosilika dalam matriks aspal, serta munculnya gugus karbonat (CO_3^{2-}) yang mengindikasikan terbentuknya senyawa CaCO_3 hasil biomineralisasi oleh *E. coli*. Intensitas gugus karbonat terlihat lebih jelas pada nanosilika 5%, yang menunjukkan proses pembentukan CaCO_3 berlangsung lebih optimal.
4. Hasil karakterisasi FESEM menunjukkan bahwa penambahan nanosilika memengaruhi morfologi permukaan dan homogenitas struktur mikro aspal hibrida. Pada nanosilika 3% dan 5%, permukaan aspal terlihat lebih padat dan homogen karena nanosilika mampu mengisi rongga mikro pada binder. Selain itu, FESEM juga menunjukkan adanya struktur granular dan kristal yang diduga sebagai endapan CaCO_3 hasil proses MICP. Pada nanosilika 9% terlihat indikasi aglomerasi partikel nanosilika yang menyebabkan distribusi filler menjadi kurang merata.
5. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan adanya fase kristal CaCO_3 pada campuran aspal hibrida setelah proses inkubasi. Puncak difraksi yang muncul mengindikasikan keberadaan fase kalsit sebagai bentuk kristal CaCO_3 yang paling stabil. Intensitas puncak CaCO_3 tertinggi diperoleh pada nanosilika 5%, yang menunjukkan bahwa proses biomineralisasi berlangsung paling optimal pada variasi tersebut.

6. Variasi komposisi nanosilika berpengaruh terhadap karakteristik mekanik aspal hibrida berdasarkan hasil pengujian Marshall. Penambahan nanosilika meningkatkan nilai stabilitas, serta menurunkan nilai *flow* akibat struktur campuran menjadi lebih padat dan kaku. Variasi nanosilika 5% menghasilkan kombinasi terbaik antara stabilitas, fleksibilitas, kemampuan *self-healing*, dan hidrofobisitas sehingga dapat dianggap sebagai komposisi optimum dalam penelitian ini.

B. Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi komposisi nanosilika yang lebih banyak dan lebih rinci agar diperoleh komposisi optimum yang lebih akurat terhadap sifat *self-healing* dan hidrofobisitas aspal hibrida.
2. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jenis bakteri lain yang memiliki aktivitas urease lebih tinggi, seperti *Sporosarcina pasteurii*, untuk dibandingkan dengan *Escherichia coli* dalam proses MICP pada campuran aspal.
3. Perlu dilakukan pengujian durabilitas jangka panjang terhadap aspal hibrida, seperti ketahanan terhadap siklus basah-kering, temperatur tinggi, beban berulang, dan penuaan aspal agar diketahui kestabilan kemampuan *self-healing* pada kondisi lingkungan sebenarnya.

4. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian tambahan seperti uji rutting, fatigue, dan moisture susceptibility untuk mengetahui performa mekanik aspal hibrida secara lebih menyeluruh.
5. Karakterisasi material dapat dikembangkan menggunakan metode tambahan seperti EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), AFM (Atomic Force Microscopy), atau Raman Spectroscopy untuk memperoleh informasi yang lebih detail mengenai distribusi unsur, kekasaran permukaan, dan interaksi kimia material.
6. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan metode aplikasi bakteri yang lebih stabil, seperti enkapsulasi bakteri atau penggunaan media pembawa khusus, agar bakteri dapat bertahan lebih lama di dalam matriks aspal.
7. Perlu dilakukan penelitian skala lapangan untuk mengetahui efektivitas aspal hibrida berbasis nanosilika dan MICP pada kondisi perkerasan jalan sebenarnya sehingga dapat dipertimbangkan untuk aplikasi pada infrastruktur jalan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, G. T., et al. (2024). Integration of nano-SiO₂ in asphalt mixes: Performance and characterization. *Construction and Building Materials*.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134687>

Ahmed, R. B., Hossain, K., & Tarefder, R. A. (2019). Effect of nanosilica on moisture susceptibility of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 222, 117654.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117654>

Achal, V., Pan, X., & Özyurt, N. (2021). Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. *Scientific Reports*, 11, 85712.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-85712-6>

Al-Mousawi, E. J., et al. (2021). Nanomaterials in asphalt mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1090(1), 012007.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1090/1/012007>

Albayati, A. H., Wang, Y., & Al-Haddad, Z. (2024). Enhancing asphalt performance and its long-term durability using nano-additives. *Sustainability*, 16(3), 1234.
<https://doi.org/10.3390/su16031234>.

Alifvia, P., & Ratnawulan, R. (2024). *Perbandingan metode pelapisan beton dengan suspensi agen bakteri E. coli terhadap sifat hydrophobic dan self-healing*. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(2), 20185–20821.

Cheng, L., & Cord-Ruwisch, R. (2022). Factors affecting microbial induced calcite precipitation and its engineering applications. *Geomicrobiology Journal*, 39(3), 247–259. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1980920>

Dai, Y., Li, Y., & Zhang, J. (2023). Modification effects of nanosilica on asphalt binders: A review. *Nanotechnology Reviews*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0001>

Guo, Y., Liu, Z., & Zhang, H. (2023). Influence of nano-materials on the performance of asphalt and its self-healing capability. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135280>

Huang, H., Wang, X., & Li, Z. (2024). Nanomaterials for modified asphalt and their effects on binder and mixture performance. *Scientific Reports*, 14(1), 56789. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56789-0>

Khan, I., Ali, Y., & Mashaan, N. S. (2023). Engineering characteristics of SBS/nano-silica-modified hot mix asphalt mixtures and modeling techniques for rutting. *Buildings*, 13(3), 705. <https://doi.org/10.3390/buildings13030705>

Li, R., Pei, J., & Zhang, J. (2021). Surface wettability and adhesion properties of modified asphalt binders. *Applied Surface Science*, 541, 147918. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147918>

Li, W., Liu, L., Chen, W., Yu, L., & Li, W. (2021). Study on the mechanism of calcium carbonate precipitation induced by bacteria. *Journal of Crystal Growth*, 564, 126113. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126113>

- Liu, Q., et al. (2021). Self-healing behavior of recycled asphalt prepared by nano-silica modification. *Construction and Building Materials*, 279, 123659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123659>
- Liu, X., Chen, M., & Xu, G. (2023). Evaluation of the impact of nanomodification on self-healing behavior of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 372, 130882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130882>
- Mądry, K., & Nowicki, W. (2021). Wetting between Cassie–Baxter and Wenzel regimes. *The European Physical Journal E*, 44, 140. <https://doi.org/10.1140/epje/s10189-021-00140-8>
- Mashaan, N. S. (2022). Rutting performance of nano-silica-modified C320 bitumen. *Materials*, 15(3), 1134. <https://doi.org/10.3390/ma15031134>
- Mashaan, N. S., et al. (2022). Performance of PET and nano-silica modified stone mastic asphalt (SMA). *Construction and Building Materials*, 327, 127005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127005>
- Mohammed, M. K., Al-Mansob, R. A., & Ibrahim, M. R. (2023). Enhancing asphalt binder performance through nano-SiO₂ and nano-CaCO₃ additives: Rheological and physical insights. *Construction and Building Materials*, 368, 131234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131234>
- Monk, J. M., et al. (2023). Laboratory strains of *Escherichia coli* K-12: History, genetics, and applications. *Microbial Genomics*.

Taheri, S. M., Arabani, M., & Mirhosseini, A. F. (2022). Comprehensive assessment of nano-silica modified asphalt mixtures: Influence of RAP content, aging, and performance characteristics. *Construction and Building Materials*, 327, 127005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127005>

Tenaillon, O., et al. (2022). The population genomics of *Escherichia coli*. *Nature Reviews Microbiology*.

Wang, T., Zhao, Y., & Sun, L. (2024). Mechanism of water damage resistance in hydrophobic modified asphalt materials. *Construction and Building Materials*, 410, 134145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134145>

Zhang, L., Wu, S., & Pang, L. (2024). Microstructure and hydrophobicity of nano-modified asphalt materials. *Materials Chemistry and Physics*, 312, 128694. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128694>

Zhang, P., Liu, H., Wang, X., & Zhao, Y. (2021). Fabrication of asphalt-based superhydrophobic surface and its wetting transition behavior. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 629, 126927. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126927>

Zhang, P., Liu, H., Wang, X., & Zhao, Y. (2021). Superhydrophobic asphalt surface behavior. *Construction and Building Materials*, 292, 124406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124406>

Zhang, X., Li, Y., Wang, T., & Chen, H. (2024). Estimation of the structure of hydrophobic surfaces using the Cassie–Baxter equation. *Materials*, 17(17), 4322. <https://doi.org/10.3390/ma17174322>

Zhang, Y., Li, H., & Wang, Q. (2022). Nano-SiO₂ modified asphalt: Self-healing mechanism and molecular dynamics analysis. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 33(4), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s43065-022-00049-2>

Zhao, Y., Zhang, Y., & Li, H. (2022). A study on the road performance of the self-healing asphalt modified by nanosilica. *Construction and Building Materials*, 331, 126789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126789>

Zhou, F., Yang, S., & Li, X. (2022). Effect of nano-silica on rheological properties and microstructure of asphalt binder. *Materials Today Communications*, 31, 103593. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103593>

Zhou, X., Wang, S., & Cheng, Y. (2022). Effect of CaCO₃ on asphalt performance. *Construction and Building Materials*.