

KARAKTERISTIK MEKANIK DAN DURABILITAS MORTAR POLIMER NANOKOMPOSIT

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Doktor
Teknik Sipil Pada Program Studi Doktor Ilmu Teknik
Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya Palembang**



**Nama : Verinazul Septriansyah
NIM : 03013682227011
Bidang : Ilmu Teknik / Teknik Sipil
Promotor : Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
Ko-promotor : Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T.**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2025

DISERTASI

KARAKTERISTIK MEKANIK DAN DURABILITAS MORTAR POLIMER NANOKOMPOSIT



Nama : Yuliantri Saptrahayuh
NIM : 09010091227511
RIU : Doro Tobiah / Tehnik Sipil
Promotor : Dr. Ir. Salams, S.T., M.T.
Ko - Promotor I : Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T.

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

DISERTASI

(TKT7105)

KARAKTERISTIK MEKANIK DAN DURABILITAS MORTAR POLIMER NANOKOMPOSIT

Oleh:

Verinazul Septriasyah

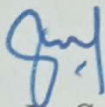
03013682227011

Telah disetujui

Pada Tanggal, Bulan, Tahun

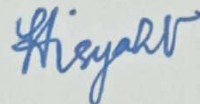
Promotor

Ko-Promotor 1



Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.

NIP. 19761031 20021 2 2001



Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T.

NIP. 19770517 200801 2039

Mengetahui,

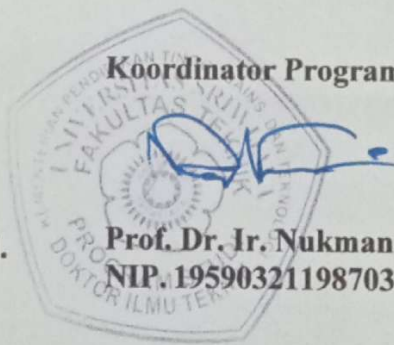
Dekan Fakultas Teknik,



Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM.

NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi



Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.

NIP. 195903211987031001

HALAMAN PERSETUJUAN

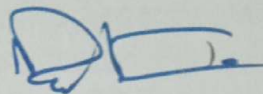
Disertasi berjudul Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Mortar Polimer Nanokomposit telah dipresentasikan dihadapan Tim Penguji Disertasi pada Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada *Senin, 14 April 2025*.

Palembang, April 2025
Tim Penguji Disertasi berupa Disertasi:

Ketua Tim Penguji:

Nama: Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.

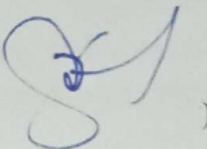
NIP : 195903211987031001

()

Anggota Tim Penguji:

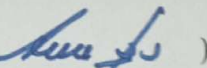
1. N a m a : Prof. Dr. rer.nat. Risfidian Mohadi, M.Si

NIP : 197711272005011003

()

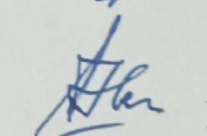
2. N a m a : Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T, M.T

NIP : 198605192019031007

()

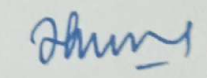
3. N a m a : Dr. Azizah Husin, M.Pd

NIP : 196006111987032001

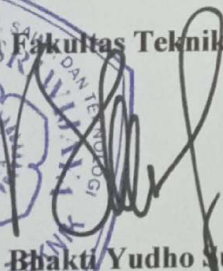
()

4. N a m a : Prof. Dr. Ir. Jonbi, M.T., M.M., MSi.INV

NIDN : 0301106303

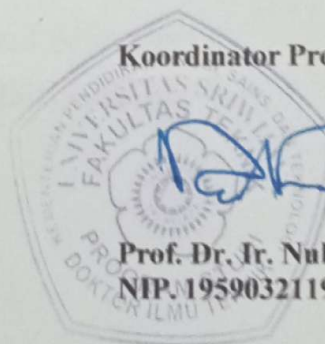
()

Mengetahui,


Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM.
NIP. 197502112003121002

Koordinator Program Studi


Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001


SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Verinazul Septriansyah
NIM : 03013682227011
Program Studi : Doktor Ilmu Teknik
BKU : Ilmu Teknik / Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi saya dengan judul “Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Mortar Polimer Nanokomposit”, bebas dari fabrikasi, falsifikasi, plagiat, kepengarangan yang tidak sah dan konflik kepentingan dan pengajuan jamak, seperti yang tercantum dalam Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia Nomor 39 Tahun 2021.

Bilamana ditemukan ketidak sesuaian dengan hal-hal di atas, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan dengan sebenar-benarnya.

Palembang, April 2025

Yang menyatakan



Verinazul Septriansyah
NIM. 03013682227011

SURAT KETERANGAN PENGECEKAN SIMILARITY

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

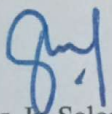
Nama : Verinazul Septriasyah
Nim : 03013682227011
Prodi : Doktor Ilmu Teknik
Fakultas : Teknik

Menyatakan bahwa benar hasil pengecekan similarity Skripsi/Tesis/Disertasi/Lap. Penelitian yang berjudul Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Mortarpolimer Nanokomposit adalah 3%. Dicek oleh operator *: 1. Dosen Pembimbing

2. UPT Perpustakaan

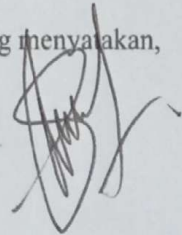
Demikianlah surat keterangan ini saya buat dengan sebenarnya dan dapat saya pertanggung jawabkan.

Menyetujui
Dosen pembimbing,


Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 19761031 20021 2 2001

Indralaya, 05 Mei 2025

Yang menyatakan,


Verinazul Septriasyah
NIM: 03013682227011

*Lingkari salah satu jawaban tempat anda melakukan pengecekan Similarity

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul "Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Mortar Polimer Nanokomposit". Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Doktor Ilmu Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.

Dalam proses penyusunan dan penyelesaian disertasi ini, saya telah menerima banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati, saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, SE. M.Si selaku Rektor Universitas Sriwijaya.
2. Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T., selaku Koordinator Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Dr. Ir. Saloma, S.T, M.T., selaku Promotor dan Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T., selaku Ko-Promotor. Terima kasih atas bimbingan, ilmu, arahan dan dorongan semangat yang telah diberikan sehingga saya dapat menyelesaikan disertasi ini.
5. Dewan penguji yang telah memberikan masukan dan arahan berharga untuk penyempurnaan disertasi ini.
6. Kedua orang tua, mertua, istri, anak-anak dan keluarga besar yang senantiasa memberikan doa, dukungan moral, dan motivasi tiada henti selama perjalanan akademik ini.
7. Rekan-rekan seperjuangan di Program Doktor Ilmu Teknik yang telah berbagi ilmu, pengalaman, dan semangat.
8. Seluruh staf pengajar dan administrasi Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian disertasi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Saya menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat saya harapkan demi pengembangan ilmu pengetahuan.

Akhir kata, semoga disertasi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang teknik material dan bagi civitas akademika Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.

Palembang, April 2025

Penulis,

Verinazul Septriansyah

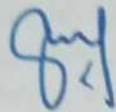
ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh inkorporasi nanosilika (SiO_2) dan perlakuan termal pada mortar polimer terhadap karakteristik fisik, mekanik, dan durabilitas dalam kondisi lingkungan agresif. Studi ini fokus pada optimalisasi komposisi nanokomposit, menganalisis efek modifikasi mikrostruktur, dan mengevaluasi ketahanan jangka panjang material dalam lingkungan kritis termasuk air laut, air rawa, dan larutan asam sulfat. Metode eksperimental melibatkan sintesis mortar polimer berbasis epoxy resin dengan pendekatan sistematis. Nanokomposit dibuat melalui inkorporasi nanosilika pada variasi kadar 0%, 0,3%, 0,4%, dan 0,5% berat dengan matriks epoxy resin pada rasio perbandingan 1:1. Untuk menganalisis efek perlakuan termal, spesimen subjek pada pemanasan 85°C selama 1 jam. Pengujian durabilitas dilaksanakan melalui perendaman selama 90 hari dengan metode siklus dan statis. Karakterisasi material dilakukan menggunakan teknik analitis multi-disiplin meliputi pengukuran berat jenis (densitas), uji kuat tekan standar ASTM C109, analisis mikrograf dengan Scanning Electron Microscope (SEM), identifikasi fase kristal menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), dan analisis spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR) untuk identifikasi ikatan kimia. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan nanosilika 0,4% berat menghasilkan peningkatan signifikan pada kuat tekan hingga 45,23 MPa (peningkatan 23,4% dibandingkan kontrol) dengan densitas optimal $1573,33 \text{ kg/m}^3$. Analisis FTIR mengidentifikasi intensifikasi ikatan Si-O-Si pada bilangan gelombang $1050\text{-}1080 \text{ cm}^{-1}$, mengkonfirmasi integrasi nanosilika ke dalam matriks polimer dan peningkatan derajat ikatan silang. Mikrograf SEM menunjukkan reduksi volumetrik porositas hingga 68% dengan distribusi partikel nanosilika yang homogen (koefisien dispersi 0,87) pada matriks epoxy. Analisis XRD mengkonfirmasi bahwa nanosilika terinkorporasi dalam bentuk amorf dengan ukuran partikel 54-100 nm, dengan kemurnian SiO_2 mencapai 99%. Perlakuan termal pada 85°C selama 1 jam terhadap spesimen dengan nanosilika 0,4% menghasilkan peningkatan kuat tekan hingga melebihi 50 MPa dengan stabilitas struktur yang superior setelah perendaman dalam lingkungan agresif. Evaluasi durabilitas menunjukkan bahwa spesimen dengan modifikasi nanosilika dan perlakuan termal mempertahankan integritas struktural dan properti mekanik dengan degradasi minimal setelah 90 hari eksposur terhadap air laut, air rawa, dan asam sulfat. Korelasi komprehensif antara analisis FTIR, XRD, dan SEM mengungkapkan mekanisme fundamental peningkatan sifat mekanik yang melibatkan: (1) pengisian rongga mikrostruktur oleh partikel nanosilika, (2) peningkatan ikatan antarmuka antara matriks polimer dan agregat, (3) modifikasi struktural fase silika, dan (4) peningkatan kristalinitas dengan penurunan regangan kisi pada silika. Penelitian ini menyimpulkan bahwa modifikasi mortar polimer

dengan nanosilika 0,4% dikombinasikan dengan perlakuan termal pada 85°C menghasilkan material konstruksi dengan performa superior untuk aplikasi dalam lingkungan agresif. Studi ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan material konstruksi berbasis polimer dengan durabilitas tinggi dan memiliki implikasi penting untuk aplikasi infrastruktur di daerah pesisir, rawa, dan lingkungan dengan eksposur asam.

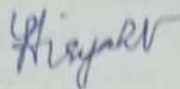
Kata kunci: mortar polimer nanokomposit, nanosilika, durabilitas, epoxy resin, kuat tekan, mikrostruktur, air laut, air rawa, asam sulfat

Promotor



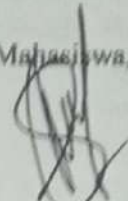
Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 19761031 20021 2 2001

Ko-Promotor 1



Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T.
NIP. 19770517 200801 2039

Mahasiswa,



Verinazul Septriansyah
NIM. 03013682227011

Koordinator Program Studi


Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR.....	ii
ABSTRAK	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	xi

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Ruang Lingkup Penelitian	5
1.5. Perbedaan dan Keaslian Penelitian.....	6
1.6. Metode Pengumpulan Data	10
1.7. Sistematika Penulisan.....	10

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pendahuluan	12
2.2. Polimer	12
2.3. Nanomaterial.....	13
2.4. Jenis-jenis Nanomaterial	14
2.4.1. Material Nano Alumina.....	14
2.4.2. Material Nano Clay	16
2.4.3. Material Nano Kaolin	17
2.4.4. Material Carbon Nanotubes.....	18
2.4.5. Material Titanium Oxide (TiO ₂).....	19
2.4.6. Material Nanosilika (SiO ₂)	19
2.4.7. Sifat Struktural Nanosilika	20
2.4.8. Pengaruh Nanosilika.....	22

2.5. Epoxy Resin dan Hardener	23
2.5.1. Persentase Nanosilika (SiO ₂), Epoxy resin dan hardener	24
2.5.2. Pengaruh temperatur Agregat halus, epoxy resin dan hardener	24
2.5.3. Pengaruh temperatur nanosilika, agregat halus, epoxy resin dan hardener	25
2.6. Pengaruh Asam Sulfat Terhadap beton	25
2.7. Pengaruh Air laut terhadap beton	37
2.8. Pengujian Sifat Mekanik	38
2.8.1. Pengujian Slump Flow	38
2.8.2. Setting Time	39
2.8.3. Berat Jenis	39
2.8.4. Kuat Tekan	40
2.9. Pengujian Minerlogi	41
2.9.1. <i>Scanning Elektro Microscope</i> (SEM)	42
2.9.2. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	43
2.9.3. <i>Pectroscopy Fourier Transform Infraret</i> (FT-IR)	44

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alur Penelitian	46
3.2. Material Pembentuk Polimer Nanokomposit	48
3.3. Peralatan	49
3.4. Tahapan Pengujian di Laboratorium	51
3.4.1. Tahap I	52
3.4.2. Tahap II	52
3.4.3. Tahap III	52
3.4.4. Tahap IV	53
3.4.3. Tahap V	55

BAB IV. HASIL dan PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Material	56
4.1.1 Hasil Pengujian Nanosilika (SiO ₂)	56
4.1.2. Hasil Pengujian Agregat Halus	57

4.2. Sifat Fisik dan Mekanik Mortar Polimer Nanokomposit.....	59
4.2.1. Berat Jenis	59
4.2.2. Kuat Tekan	60
4.2.3. <i>Spectroscopy Fourier Transform Infrared</i> (FT-IR)	62
4.2.4. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	65
4.3. Durabilitas di Lingkungan Air Laut.....	67
4.3.1. Berat Jenis	67
4.3.2. Kuat Tekan	69
4.3.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	70
4.3.3.1. Pengujian SEM dan distribusi partikel dengan metode Siklik.....	70
4.3.3.2. Pengujian SEM dan distribusi partikel dengan metode Statik.....	73
4.3.4. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	76
4.3.5. Kondisi Fisik Setelah Perendaman Air Laut dengan metode siklik dan statik.....	80
4.4. Durabilitas di Lingkungan Air Rawa	84
4.4.1. Berat Jenis	84
4.4.2. Kuat Tekan	86
4.4.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	87
4.4.3.1. Pengujian SEM dan distribusi partikel dengan metode Siklik.....	87
4.4.3.2. Pengujian SEM dan distribusi partikel dengan metode Statik.....	91
4.4.4. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	94
4.4.5. Kondisi Fisik Setelah Perendaman Air Rawa dengan metode siklik dan statik	97
4.5. Durabilitas di Lingkungan Air Asam Sulfat	101
4.5.1. Berat Jenis	101
4.5.2. Kuat Tekan	102
4.5.3. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	104
4.5.3.1. Pengujian SEM dan distribusi partikel dengan metode Siklik.....	104
4.5.3.2. Pengujian SEM dan distribusi partikel dengan metode Statik.....	107
4.5.4. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	110
4.5.5. Kondisi Fisik Setelah Perendaman Air Rawa dengan metode siklik dan statik	113

BAB V. KESIMPULAN dan SARAN

5.1. Kesimpulan	118
5.1. Saran.....	123

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Ukuran spesifikasi luas permukaan	14
Gambar 2.2 Morfologi SEM partikel nano alumina.....	15
Gambar 2.3 Hubungan waktu curing terhadap kuat tekan	15
Gambar 2.4 Kuat tekan nano clay	16
Gambar 2.5 Morfologi SEM nano clay	16
Gambar 2.6 Foto SEM nano kaolin.....	17
Gambar 2.7 Carbon nanotubes	18
Gambar 2.8 Morfologi SEM nano TiO ₂	19
Gambar 2.9 Foto SEM Nanosilika	21
Gambar 2.10 Hasil X-Ray Diffraction (XRD)	21
Gambar 2.11 Efek nanosilika terhadap mortar.....	22
Gambar 2.12 Struktur kimia epoxy resin Type bisphenol A.....	23
Gambar 2.13 Variasi berat Nano SiO ₂ dalam Matriks	24
Gambar 2.14 Hasil kuat tekan terhadap Temperatur.....	24
Gambar 2.15 Hasil Kuat Tekan umur 28 hari	25
Gambar 2.16 Struktur Asam Sulfat	26
Gambar 2.17 Perubahan fisik beton yang direndam H ₂ SO ₄	26
Gambar 2.18 Kehilangan kuat tekan beton terkena serangan asam sulfat	27
Gambar 2.19 Pengaruh air laut yang dikompositkan nanosilika.....	37
Gambar 2.20 Proses Pengujian Slump flow	38
Gambar 2.21 Hasil pengujian setting time	39
Gambar 2.22 Berat jenis umur 28 hari	40
Gambar 2.23 Hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari	41
Gambar 2.24 Hasil pengujian SEM (A) PNK-Suhu 750C, (B) PNK-Suhu 850C, (C) PNK-Suhu 950C, (D) PNK-Suhu 1050C.....	42
Gambar 2.25 Hasil analisa XRD sampel serbuk halus.....	43
Gambar 2.26 Hasil Uji FTIR (A) PNK -Suhu 750C dan (B) PNK-Suhu 850C, (C) PNK-Suhu 950C dan (D) PNK-Suhu 1050C	44
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	47

Gambar 3.2	Epoxy resin dan hardener	48
Gambar 3.3	Nanopartikel Silika (SiO ₂)	48
Gambar 3.4	Agregat halus	49
Gambar 3.5	Alat uji kuat tekan nanokomposit	50
Gambar 3.6	Alat uji Scanning Electron Microscope (SEM)	51
Gambar 3.7	Alat uji X-Ray Diffraction (XRD)	51
Gambar 3.8	Menimbang epoxy resin, hardener dan Nanosilika	54
Gambar 3.9	Benda uji yang dikeluarkan dalam cetakan	54
Gambar 3.10	Pengujian kuat tekan dan berat jenis	55
Gambar 4.1	Hasil X-Ray Diffraction (XRD)	57
Gambar 4.2	Hasil pengujian analisa saringan agregat halus	58
Gambar 4.3	Berat Jenis umur 28 hari	59
Gambar 4.4	Kuat tekan umur 28 hari	61
Gambar 4.5	Hasil uji FT-IR dengan perbandingan 1:1	63
Gambar 4.6	Hasil uji FT-IR dengan perbandingan 2:1	64
Gambar 4.7	Hasil uji SEM Nanosilika	65
Gambar 4.8	Distribusi partikel	66
Gambar 4.9	Hasil berat jenis perendaman di air laut	68
Gambar 4.10	Hasil kuat tekan perendaman di air laut	69
Gambar 4.11	Hasil uji SEM siklik perendaman di air Laut	71
Gambar 4.12	Distribusi partikel	72
Gambar 4.13	Hasil uji SEM statik perendaman di air Laut	74
Gambar 4.14	Distribusi partikel	75
Gambar 4.15	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP)	77
Gambar 4.16	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP N.0,4%)	78
Gambar 4.17	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP N.0,4% T.85 °C)	79
Gambar 4.18	Kondisi perendaman secara siklik	81
Gambar 4.19	Grafik hasil uji kondisi perendaman secara siklik	82
Gambar 4.20	Kondisi perendaman secara statik	82
Gambar 4.21	Grafik hasil uji kondisi perendaman secara statik	83
Gambar 4.22	Hasil berat jenis perendaman di air rawa	85
Gambar 4.23	Hasil kuat tekan perendaman di air rawa	86

Gambar 4.24	Hasil uji SEM siklik perendaman di air rawa.....	88
Gambar 4.25	Hasil uji distribusi partikel siklik perendaman di air rawa.....	89
Gambar 4.26	Hasil uji SEM static perendaman di air rawa	92
Gambar 4.27	Hasil uji distribusi partikel static perendaman di air rawa	93
Gambar 4.28	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP) air rawa	95
Gambar 4.29	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP N.0,4%) air rawa.....	96
Gambar 4.30	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP N.0,4% T.85 ° C) air rawa.....	97
Gambar 4.31	Kondisi perendaman secara siklik	98
Gambar 4.32	Grafik hasil uji kondisi perendaman secara siklik.....	98
Gambar 4.33	Kondisi perendaman secara statik	99
Gambar 4.34	Grafik hasil uji kondisi perendaman secara statik.....	100
Gambar 4.35	Hasil berat jenis perendaman di air asam sulfat	101
Gambar 4.36	Hasil kuat tekan perendaman di air asam sulfat	103
Gambar 4.37	Hasil uji SEM siklik perendaman di air asam sulfat	105
Gambar 4.38	Hasil uji distribusi partikel siklik perendaman di asam sulfat.....	106
Gambar 4.39	Hasil uji SEM statik perendaman di air asam sulfat.....	108
Gambar 4.40	Hasil uji distribusi partikel statik perendaman di asam sulfat.....	109
Gambar 4.41	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP) asam sulfat.....	110
Gambar 4.42	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP N.0,4%) asam sulfat.....	111
Gambar 4.43	Hasil uji XRD Mortar polimer (MP N.0,4% T.85 ° C) air asam sulfat	112
Gambar 4.44	Kondisi perendaman secara siklik	113
Gambar 4.45	Grafik hasil uji kondisi perendaman secara siklik.....	114
Gambar 4.46	Kondisi perendaman secara statik	115
Gambar 4.47	Grafik hasil uji kondisi perendaman secara siklik.....	116

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1. Persamaan dan perbedaan usulan penelitian	7
Tabel 2.1. Hasil pengujian sifat mekanik	13
Tabel 2.2. Karakteristik micro Silika.....	19
Tabel 2.3. Karakteristik Nano Silika	20
Tabel 2.4. Sifat fisik epoxy.....	23
Tabel 2.5. Hasil penelusuran pengaruh asam	28
Tabel 2.6. Kuat tekan beton terhadap air beton	37
Tabel 2.7. Persentase struktur amorf dan kristalin	43
Tabel 3.1. Komposisi campuran polimer nanokomposit.....	52
Tabel 3.2. Komposisi campuran polimer nanokomposit terhadap asam sulfat, air laut dan air rawa	53
Tabel 4.1. Hasil Pengujian agregat halus	57
Tabel 4.2. Interpretasi uji FT-IR dengan perbandingan 1:1	62
Tabel 4.3. Interpretasi uji FT-IR dengan perbandingan 2:1	63

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pemahaman yang mendalam tentang teknologi material beton memainkan peran penting dalam mewujudkan konstruksi yang kuat, tahan lama, dan berkualitas tinggi. Kemajuan teknologi secara signifikan mendukung perkembangan berbagai sektor industri, termasuk sektor konstruksi (Hospodarova et al., 2018). Industri konstruksi saat ini memiliki berbagai tantangan pengembangan material yang inovatif, hemat energi dan tahan lama.

Polimer terbentuk dari sejumlah unit molekul kecil yang tersusun. Polimer tidak bisa terbentuk sendiri tanpa adanya reaksi kimia. Polimer kini semakin banyak dimanfaatkan dalam bidang struktur bangunan sebagai alternatif pengganti semen untuk bahan perekat. Salah satu keunggulan beton polimer adalah kemampuannya memberikan kekuatan mekanis yang tinggi (Kiruthika et al., 2020). Komposit beton berbasis polimer dengan formula resin dan agregat berukuran mikro memiliki keistimewaan antara kemampuan lain yaitu mengeras dengan waktu singkat dan karakteristik mekanis yang menakjubkan, termasuk kekuatan ikat dan ketahanan struktural yang tinggi. Suhu berpengaruh signifikan terhadap agregat halus, resin epoksi, dan pengeras, yang dapat meningkatkan kekuatan tekan seiring bertambahnya usia matriks resin epoksi hingga mencapai 60 hari. Pada usia 30 hari, matriks ini sudah dapat dimanfaatkan sebagai material untuk perbaikan beton (Xu, et al., 2021). Teknologi material maju berbasis polimer menampilkan potensi pengembangan kekuatan yang substansial, melampaui batasan kinerja sistem konstruksi konvensional dan menghasilkan produk dengan karakteristik struktural yang unggul. Dari tiga jenis polimer yang digunakan, hanya resin epoksi yang menunjukkan kekuatan tekan lebih unggul dibandingkan bahan pengikat lainnya, seperti polyester dan vinil ester (Mehrab Nodehi., 2021). Parameter termal dan temporal proses sintesis berpengaruh signifikan terhadap sifat struktural nanokomposit. Sebagai ilustrasi, kondisi pemanasan pada suhu 85°C dengan durasi satu jam menghasilkan nilai kekuatan kompresi mencapai 56,65 MPa, disertai kepadatan material sebesar 1.464 kg/m³ pada periode pengujian 28 hari. Namun,

peningkatan suhu dan durasi pemanasan yang berlebihan dapat membuat matriks menjadi getas, sehingga mengurangi kuat tekan (Septriansyah et al., 2021).

Nanoteknologi telah memberikan dimensi baru pada dunia beton (Barbhuiya., 2020). Nanoteknologi adalah bidang dasar inovasi modern, untuk penemuan teknologi baru salah satu bidang yang paling banyak digunakan yaitu teknik struktural dan bahan konstruksi (Chauhan & Tiwari, 2020). Perkembangan nanoteknologi telah menarik perhatian signifikan para peneliti global, dengan fokus utama pada eksplorasi inovatif melalui pendekatan sistematis.

Nanoteknologi telah menghadirkan peluang baru untuk meningkatkan kualitas dengan nilai ekonomis, menawarkan daya tahan yang lebih lama, serta menekan biaya perawatan. Inovasi ini telah merevolusi kemajuan teknik sipil, khususnya dalam penerapan lapisan pelindung untuk mencegah korosi, serta kerusakan akibat serangan sulfat dan air garam pada beton. Sebagai teknologi yang menjanjikan dalam konstruksi industri, nanoteknologi memiliki dampak besar, terutama dalam meningkatkan kinerja beton. Melalui penambahan nanomaterial, kekuatan dan ketahanan beton dapat ditingkatkan secara signifikan, peningkatan tersebut disebabkan nano mengisi kekosongan pada material komposit (Boverhof et al., 2015). Berbagai konsentrasi Nano SiO₂ (mulai 0,5% hingga 2%) dan nano metakaolin (dari 1% sampai 9%) dari total berat semen memberikan hasil yang tidak seragam dalam pengujian kinerja beton. Dalam studi ketahanan terhadap serangan sulfat, nanosilika menampilkan kinerja yang lebih unggul, dengan penurunan kekuatan tekan hanya 18,6%, sementara nano metakaolin mengalami penurunan yang jauh lebih besar mencapai 41,4% (Diab et al., 2019). Beton polimer dirancang untuk memiliki ketahanan terhadap proses degradasi kimia yang dapat menurunkan kinerja materialnya. Asam sulfat diidentifikasi sebagai senyawa kimia dengan sifat yang sangat korosif terhadap beton. Penggunaan nanosilika dalam formulasi beton telah membuktikan keefektifannya dalam meningkatkan perlindungan terhadap serangan sulfat (Saloma et al., 2015). Selain itu, penggunaan agregat dengan butiran halus dapat memperkuat kekuatan mekanik beton, karena butiran halus memiliki struktur molekul yang lebih padat (Kumar et al., 2020). Pencampuran material yang terdiri dari epoxy resin, hardener, dan nanosilika dalam berbagai kadar, yaitu 1%, 2%, 3%, dan 4%, menunjukkan bahwa campuran dengan

3% nanosilika menghasilkan penurunan kuat tekan seiring dengan peningkatan jumlah nanosilika dalam matriks polimer (Kumar et al., 2018). Studi komprehensif dengan menggunakan nanosilika pada level 0,75%, 1,50%, dan 3% terhadap berat agregat halus daur ulang memperlihatkan bahwa konsentrasi 3% mampu mengoptimalkan kekuatan tekan mortar. Lebih lanjut, karakteristik nanosilika menunjukkan peningkatan kinerja seiring berkembangnya usia spesimen (Anjana Sahu et al., 2021). Evaluasi komposisi nanosilika dan nano clay dalam rentang 0% hingga 6% mengungkapkan perbaikan signifikan pada sifat mekanik dan ketahanan mortar terhadap siklus suhu dingin-cair. Fenomena ini dikaitkan dengan kemampuan nanomaterial untuk mengisi ruang secara efektif, yang mengakibatkan pembentukan matriks dengan kepadatan yang lebih tinggi (Hamid Kalhori et al., 2020).

Para peneliti mulai menggunakan nanomaterial sebagai bahan pengikat alternatif yang memiliki keunggulan berupa ukuran partikel mikroskopis, yang mampu memodifikasi struktur gel hidrasi dan menghasilkan komposisi material dengan kepadatan yang lebih tinggi (Norhasri et al., 2017). Nanometer mengacu pada objek yang memiliki setidaknya satu dimensi dalam skala nanometer, yang secara umum didefinisikan dalam rentang 1 hingga 100 nm. Penambahan nanomaterial dalam komposisi beton mampu memodifikasi karakteristik material secara komprehensif, seperti mempercepat proses hidrasi, mengurangi porositas, menghilangkan mikrostruktur yang lebih longgar, serta memicu beberapa mekanisme lainnya (Singh et al., 2019). Ketahanan material berukuran nano dapat meningkat dengan komposisi tertentu, namun penambahan nanosilika yang lebih banyak justru dapat menyebabkan penurunan kuat tekan beton (Huang et al., 2020). Berdasarkan kuat tekan dengan membandingkan efek nano SiO₂, nano Al₂O₃ dan nano ZnO pada sifat geopolimer. Berdasarkan hasil pengujian nano SiO₂, Nano Al₂O₃ dan nano ZnO didapat nanosilika lebih unggul 40% dan penyerapan air nanosilika menunjukkan nilai terendah dibandingkan nano lainnya. Partikel berukuran nano memiliki karakteristik unik dengan luas permukaan interaksi yang sangat besar. Peningkatan jumlah partikel yang berinteraksi menghasilkan material dengan ikatan antarpartikel lebih kuat, yang secara signifikan meningkatkan kualitas mekanis material. Namun, proses penambahan partikel nano tidak selalu

linier dengan peningkatan kekuatan. Terdapat titik jenuh di mana penambahan material nano malah menurunkan performa material. Nanosilika (SiO_2) merupakan salah satu implementasi teknologi nano yang telah diaplikasikan dalam formulasi campuran beton (Zidi et al., 2021).

Riset sebelumnya menunjukkan potensi signifikan penggunaan nanosilika, pasir, epoxy resin, dan hardener. Penelitian ini bermaksud memperdalam penyelidikan dengan meneliti pengaruh pemanasan dan menambahkan dimensi baru melalui pengujian ketahanan terhadap serangan kimia dari asam sulfat, air laut berkadar garam tinggi, dan air rawa asam. Penelitian ini memanfaatkan nanosilika dengan tujuan mengoptimalkan kekuatan tekan, sementara epoksi dan hardener dipilih karena keunggulan sifat mekanis mereka. Tujuan utama dari kombinasi material ini adalah menghasilkan matriks polimer yang memiliki daya tahan kimia unggul, kekuatan struktural tinggi, dan kepadatan rendah.

Penelitian dirancang untuk menghasilkan material inovatif yang dapat diaplikasikan dalam perbaikan struktur beton, dengan penekanan pada kemampuan bertahan terhadap serangan asam dan keunggulan sifat mekanis. Dengan mempertimbangkan kompleksitas tersebut, penulis mengajukan judul disertasi: **“Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Mortar Polimer Nanokomposit”**.

1.2. Rumusan Masalah

Penggunaan nanosilika pada campuran mortar polimer memberikan dampak positif dalam memperbaiki sifat mekanik pada beton normal. Penggunaan nanosilika yang dikombinasikan dengan pasir, epoxy resin dan hardener memiliki potensi yang baik terhadap peningkatan sifat mekanik. Oleh karena itu perlu dilakukan kajian terhadap perilaku campuran material nanokomposit dengan menggunakan pendekatan eksperimental agar dapat diketahui karakteristik dan performanya. Ada beberapa rumusan masalah dalam penelitian ini:

1. Bagaimana karakteristik nanosilika dan morfologi permukaan spesimen terhadap perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H_2SO_4)?
2. Bagaimana sifat mekanik material nanokomposit yang dipengaruhi oleh perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H_2SO_4)?

3. Bagaimana tingkat ketahanan specimen yang diberikan pengaruh temperatur 85°C selama 1 jam dan perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H₂SO₄)?
4. Bagaimana sifat material nanosilika dengan pengujian mineralogy yang meliputi pengujian *Scanning microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) terhadap perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H₂SO₄)?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi perilaku campuran material berskala nano dengan pendekatan eksperimental. Sehingga matrix dalam penelitian ini memiliki material yang kuat tekan tinggi, berat jenis yang ringan dan tahan terhadap serangan asam. Tujuan spesifik penelitian ini mencakup:

1. Melakukan analisis mendalam terhadap karakteristik nanosilika dan morfologi permukaan specimen terhadap perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H₂SO₄);
2. Menganalisis sifat mekanik material nanokomposit yang meliputi kuat tekan dan berat jenis terhadap perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H₂SO₄);
3. Menganalisis tingkat ketahanan specimen yang diberikan pengaruh temperatur 85°C selama 1 jam dan perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H₂SO₄);
4. Memahami sifat material nanosilika dengan pengujian mineralogy yang meliputi pengujian *Scanning microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) terhadap perendaman Air laut, air rawa dan asam sulfat (H₂SO₄);

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini untuk menyelidiki potensi nanosilika SiO₂ dalam meningkatkan kekuatan material tekan, dengan menggunakan epoksi resin dan hardener sebagai matriks. Bahan-bahan tersebut dipilih berdasarkan karakteristik mekanik epoxy yang memiliki kekakuan dan kekuatan yang lebih unggul dibandingkan beton konvensional. Ruang lingkup penelitian meliputi:

1. Material campuran yaitu pasir sebanyak 995 kg, nano- SiO₂ sebanyak 1,3 kg, epoxy resin dan hardener sebanyak 367 kg. Temperatur yang digunakan 85°C selama 1 jam data tersebut diambil dari penelitian Septriasyah et al. (2021).
2. Pengujian mekanik meliputi berat jenis dan kuat tekan yang dipengaruhi oleh asam sulfat (H₂SO₄), Air Laut, dan air rawa.
3. Pengujian mineralogy yang meliputi pengujian *Scanning microscope* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Spectroscopy Fourier Transform infrared* (FT-IR) yang di pengaruh asam sulfat (H₂SO₄), air Laut, dan air rawa.

1.5. Perbedaan dan Keaslian Penelitian

Penelitian ini merupakan bagian dari pemanfaatan nanosilika, epoxy resin dan pasir sebagai campuran pembuatan mortar polimer berdasarkan studi literatur yang telah dipelajari. Adapun persamaan dan perbedaan usulan penelitian sebelumnya:

Tabel 1.1. Persamaan dan perbedaan usulan penelitian dengan penelitian sebelumnya

Uraian	Penelitian yang diusulkan bahan: (Nano SiO ₂ + Pasir + Epoxy resin + Hardener) direndam dengan air laut, air rawa dan asam sulfat dengan metode siklik dan statik	Zheng, et al (2019) (Epoxy resin + Nanosilika+ pasir)	Hadiyawarman, et al (2008) (epoxy resin + nanosilika)	Patel, et al (2018) (Resin + hardener + partikel nano SiO ₂)	Ataabadi, et al (2020) (Epoxy resin + ageregat halus)
Judul	Karakteristik mekanik dan Durabilitas Mortar Polimer Nanokomposit	Studies on Curing Kinetics and Tensile Propertis of Silica-Filled phenolic Amine/Epoxy Resin Nanocomposite	Fabrikasi Material Nanokomposit superkuat, ringan, dan transparan menggunakan metode simple Mixing	Dispersion of SiO ₂ Nano partikel on Epoxy Based Polymer nano Composites and its Caracteriztion	Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation
Material	• Nano SiO₂ • Pasir • Epoxy resin • Hardener • Asam Sulfat • Air Laut • Air Rawa	• Epoxy resin • Hardener • Nano SiO₂ • Pasir	• Epoxy resin • Hardener • Nano SiO₂	• Epoxy resin • Hardener • Nano SiO₂	• Epoxy resin • Hardener • Ageregat halus • Semen • Asam sulfat
Metode Pengujian	• Berat Jenis • Kuat Tekan Beton • SEM • XRD • FT-IR	• Uji Tarik • SEM	• Pengujian daya tahan tekan • FT-IR	• Kuat tarik • Kuat lentur • FT-IR • SEM • AFM (Atomic Force Microscopy)	• Pengujian daya tahan tekan • Kuat tarik belah • Kuat lentur
Komposisi Bahan dan Campuran	• Nano SiO₂ : 1,3 Kg (0,4% dari berat epoxy resin) • Pasir : 995 Kg • Epoxy Resin : 367 kg • Hardener : 367 Kg • Asam Sulfat 5% • Air laut • Air rawa	• Nano SiO₂ : 0; 1; 1,5; 2; 2,5 % dari berat epoxy resin • Epoxy resin hardener dengan perbandingan 2:1 • Pasir	• Nano SiO₂ : 0; 1; 0,04; 0,08; 0,10; 0,12; 0,14; 0,16; 0,2 gram. Untuk kubus 5 x 5 x 5 cm • Epoxy resin dan hardener menggunakan perbandingan 1:1	• Nano SiO₂ : 1; 2; 3; dan 4 wt. • Epoxy resin (LY556) dan hardener (HY951) dengan perbandingan 1: 1,5	• Resin (15%; 18%; 21%; 24% dan 27%) • Agregat halus 20,2% • Asam sulfat (PH.1) sebanyak 5%
Prosedur Campuran	Semua material dan alat cetak terlebih dahulu dipanaskan dengan	Partikel nano SiO ₂ dipanaskan pada suhu	Proses persiapan bahan dimulai dengan memanaskan partikel nano	Bahan epoxy dan hardener disinter	Seluruh material dicampur dan diaduk

Uraian	Penelitian yang diusulkan bahan: (Nano SiO ₂ + Pasir + Epoxy resin + Hardener) direndam dengan air laut, air rawa dan asam sulfat dengan metode siklik dan statik	Zheng, et al (2019) (Epoxy resin + Nanosilika+ pasir)	Hadiyawarman, et al (2008) (epoxy resin + nanosilika)	Patel, et al (2018) (Resin + hardener + partikel nano SiO ₂)	Ataabadi, et al (2020) (Epoxy resin + agregat halus)
	suhu 85° C selama 1 jam, lalu semua material dicampur hingga komposit. Waktu pencampuran epoxy resin + nanosilika selama 5 menit, ditambah hardener 5 menit dan pasir 10 menit Campuran kemudian dituangkan kedalam cetakan baja yang telah dipanaskan sebelumnya dengan suhu 85° C selama 1 jam . Kemudian material dipanaskan kembali dengan suhu 85° C selama 1 jam dan dikeluarkan dalam oven dibiarkan dalam suhu ruang. Setelah specimen umur 28 hari dilakukan perendaman kedalam cairan asam sulfat sebanyak 5%, air laut dan air rawa Berdasarkan ASTM C267-97 untuk menentukan tingkat serangan specimen direndam selama 1 ; 7; 14; 28; 56 dan 84 hari. Pada penelitian ini direndam selama 90 hari Perendaman air laut dan rawa dilakukan langsung kepantai dan rawa-rawa.	100° C selama 2 jam. Epoxy resin ikut di oven dengan suhu berbeda 200° C dari suhu awal 20° C. Bahan diaduk dan divakum untuk menghilangkan gelembung udara. Campuran kemudian dituangkan kedalam cetakan baja yang telah dipanaskan sebelumnya dengan suhu 40° C selama 3 jam.	SiO₂, resin epoksi, dan hardener dalam oven pada suhu 75°C selama 12 menit untuk kondisioning awal bahan. Selanjutnya resin epoxy dan hardener dicampur dengan perbandingan komposisi yang sama (1:1), membentuk campuran dasar polimer. Nanopartikel SiO₂ diintegrasikan ke dalam campuran resin epoxy dan hardener dengan memperhatikan rasio massa nanopartikel yang spesifik. Tahap pemanasan akhir bertujuan mengevaporasi pelarut, menghasilkan material nanokomposit berbentuk padat dengan struktur yang kompak dan homogen.	terlebih dahulu pada suhu 70° C untuk menurunkan viskositas selama 30 menit. Kemudian material epoxy, hardener dan nano SiO₂ diaduk dengan ultrasonic selama 30 menit. Campuran kemudian dituangkan kedalam cetakan dan dibiarkan dalam suhu ruangan selama 24 jam kemudian sampel dikeluarkan dari cetakan.	dengan kecepatan 300 rpm selama 3 menit, lalu dituangkan ke dalam cetakan. Resin dipanaskan pada berbagai suhu, yaitu 23°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, dan 400°C. Setelah 24 jam, specimen diangkat dari cetakan dan dibiarkan mengering pada suhu ruangan selama beberapa hari. Material yang telah mencapai usia 28 hari kemudian direndam dalam larutan asam sulfat dengan durasi perendaman selama 6 bulan dan 9 bulan.
Variabel Penelitian	• Jenis Material • Komposisi campuran • Teknik dan Metode	• Jenis Material • Komposisi campuran • Teknik dan Metode	• Jenis Material • Komposisi campuran • Teknik dan Metode	• Jenis Material • Komposisi campuran • Teknik dan Metode	• Jenis Material • Komposisi campuran

Uraian	Penelitian yang diusulkan bahan: (Nano SiO ₂ + Pasir + Epoxy resin + Hardener) direndam dengan air laut, air rawa dan asam sulfat dengan metode siklik dan statik	Zheng, et al (2019) (Epoxy resin + Nanosilika+ pasir)	Hadiyawarman, et al (2008) (epoxy resin + nanosilika)	Patel, et al (2018) (Resin + hardener + partikel nano SiO ₂)	Ataabadi, et al (2020) (Epoxy resin + agregat halus)
					• Teknik dan Metode
Hasil yang diharapkan	Penggunaan campuran nano SiO ₂ mampu meningkatkan kuat tekan, berat jenis yang ringan dan tahan terhadap serangan asam	Penggunaan Nanopartikel SiO ₂ 1,5 % memainkan peranan penting dalam kinerja kuat tarik. Terjadi peningkatan kuat tarik sebesar 33%.	Penambahan nano SiO ₂ dengan berbagai variasi komposisi material, durasi proses, dan suhu pengujian terbukti mampu meningkatkan kekuatan mekanik material hingga 24% dibandingkan dengan spesimen tanpa penambahan nanomaterial. Keberadaan gelembung dalam struktur nanokomposit menghambat pencapaian kekuatan material secara maksimal, yang mengindikasikan perlunya optimasi proses fabrikasi untuk meminimalkan cacat struktural. Analisis Fourier Transform Independent (FT-IR) memungkinkan identifikasi dan karakterisasi jenis ikatan kimia yang terbentuk. Penelitian menunjukkan bahwa dengan penambahan nano silika, jumlah ikatan berkurang dari enam menjadi lima. Variasi ini mengungkapkan bahwa nano SiO ₂ memiliki pengaruh signifikan terhadap transformasi dan struktur ikatan kimia dalam material.	Dengan pengadukan ultrasonic material tercampur sangat merata. Kekuatan meningkat dengan bertambahnya partikel nano Grafik FT-IR menunjukkan keberadaan C=O dan O=H sangat baik Kuat tarik, kuat lentur, meningkat signifikan pada 3% berat partikel nano SiO ₂ .	Pengujian kuat tekan, penyerapan air dan durabilitas asam sulfat dan pemanasan menunjukkan bahwa kandungan polimer maksimum adalah 24% yang mencapai karakteristik dan mekanik. Tingginya temperatur sangat mempengaruhi sifat mekanik pada specimen

Keterbaruan penelitian ini terletak pada beberapa aspek inovasi yang membedakan dari studi sebelumnya. Pertama, penggunaan dosis nanosilika yang jauh lebih rendah (0,4%) dibandingkan penelitian sebelumnya (1-5%) hal ini menunjukkan efisiensi penggunaan material yang lebih tinggi. Metode persiapan yang dikembangkan juga lebih sederhana dan hemat energy, melibatkan pemanasan bahan daan cetakan pada suhu (85°C) selama 1 jam, berbeda dengan suhu tinggi (300-500°C) yang digunakan sebelumnya. Pencampuran menggunakan mixer konvensional menggantikan metode ultrasonic yang lebih kompleks, sementara proses curing dua tahap meliputi pemanasan pascapenuangan dan pemanasan kembali selama 1 jam. Kemudian dibiarkan mendingin pada suhu ruang yang mengoptimalkan pembentukan struktur material.

Selain itu, formulasi material yang inovatif dengan menggabungkan nanosilika, pasir, epoxy resin dan hardener dapat mengurangi biaya produksi pembuatan material injeksi hingga 40%, dan juga berpotensi meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton hasil perbaikan. Penggunaan suhu yang lebih rendah dan pengurangan jumlah nanosilika juga berkontribusi pada aspek keberlanjutan dengan mengurangi jejak karbon dari proses produksi. Keseluruhan inovasi ini membuka peluang bagi aplikasi yang lebih luas dalam perbaikan infrastruktur beton dengan metode yang lebih efisien, ekonomis dan ramah lingkungan.

1.6. Metode Pengumpulan Data

Pada penelitian ini, data dikumpulkan melalui dua metode berikut

1. Data primer diperoleh secara langsung melalui penelitian yang dilakukan, meliputi data benda uji serta hasil pengujian di laboratorium.
2. Data sekunder diperoleh dari sumber yang sudah ada, seperti e-jurnal internasional, tinjauan literatur, dan referensi lain yang relevan dengan topik penelitian ini.

1.7. Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan disertasi ini disusun dalam lima bab yang diuraikan sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan.

Bab ini mencakup latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, keaslian dan perbedaan penelitian, metode pengumpulan data, serta sistematika penulisan disertasi.

Bab II Tinjauan Pustaka.

Bab ini mengulas teori-teori dan hasil kajian literatur yang mendukung penelitian, dengan fokus pada topik “Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Mortar Polimer Nanokomposit.”

Bab III Metodologi Penelitian.

Bab ini menjelaskan metodologi penelitian yang meliputi diagram alur penelitian, deskripsi bahan yang digunakan, peralatan penelitian, serta metode pengujian yang akan dilakukan.

Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini memaparkan hasil penelitian yang mencakup karakteristik agregat halus, uji XRD nanosilika, berat jenis, kuat tekan, serta analisis menggunakan FT-IR, SEM, dan XRD. Pembahasan dilakukan untuk menganalisis hasil secara terperinci

Bab V Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan secara keseluruhan. Selain itu, diberikan saran-saran untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.

Daftar Pustaka

Bagian ini mencantumkan seluruh referensi yang digunakan dalam penelitian, termasuk buku, jurnal, dan sumber ilmiah lainnya yang relevan

DAFTAR PUSTAKA

- Abhilash, P.P. et al. (2021) „*Effect of nano-silica in concrete; a review*’, *Construction and Building Materials*, 278, p. 122347. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122347>.
- Apostolidis, P. et al. (2019) „*Kinetic Viscoelasticity of Crosslinking Epoxy Asphalt*’, *Transportation Research Record*, 2673(3), pp. 551–560. Available at: <https://doi.org/10.1177/0361198119835530>.
- Arasteh-Khoshbin, O., Seyedpour, S.M. and Ricken, T. (2022) „*The effect of Caspian Sea water on mechanical properties and durability of concrete containing rice husk ash, nano SiO₂, and nano Al₂O₃*”, *Scientific Reports*, 12(1), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24304-4>.
- Arya, A. dan Sharma, A. L. (2018) „*Structural, microstructural and electrochemical properties of dispersed-type polymer nanocomposite films*”, *Journal of Physics D: Applied Physics*.
- Aiken, T.A. et al. (2018) „*Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymers to sulfuric acid attack*”, *Cement and Concrete Research*, 111(June), pp. 23–40. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.011>.
- Barbhuiya, G.H. et al. (2020) „*Effects of the nanosilica addition on cement concrete: A review*”, *Materials Today: Proceedings*, 32, pp. 560–566. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.143>.
- Bessa, M. J., Costa, C., Reinoso, J., Pereira, C., Fraga, S and Fernandez, J. 2017. Moving into advanced nanomaterials. Toxicity of rutile TiO₂ nanoparticles immobilized in nanokaolin nanocomposites on HepG2 cell line. *Toxicology and applied pharmacology*. 316 : 114-122.
- Baz, B. et al. (2021) „*Durability assessment and microstructural analysis of 3D printed concrete exposed to sulfuric acid environments*”, *Construction and Building Materials*, 290, p. 123220. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123220>.

- Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., Jay W., Gordon, S. C. 2015. *Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 73 : 137-150.
- Chaudhary, S.K. and Sinha, A.K. (2018) „*Effect of nano silica on acid, alkali and chloride resistance of concrete*’, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(8), pp. 853–861.
- Chauhan, K. and Tiwari, R.K. (2020) „*Study of thermomechanical properties of glycidoxypropyl trimethoxy silane functionalized nanosilica/amine terminated poly (butadiene-co-acrylonitrile) rubber modified novolac epoxy composites for high performance applications*”, *Journal of Polymer Research*, 27(10). Available at: <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02278-Z>.
- Diab, A.M. et al. (2019) „*Effect of nanomaterials additives on performance of concrete resistance against magnesium sulfate and acids*”, *Construction and Building Materials*, 210, pp. 210–231. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.099>.
- Fadzil, M. A., Nurhasri, M. S. Muhd., Norliyati, M. A., Hamidah, M. S., Ibrahim, M. H. Wan, and Assrul, R. Z. 2017. Characterization of Kaolin as Nano Material for High Quality Construction. *MATEC Web of Conferences*. 103.
- Ghahari, S.A., Ghafaria, E., Assi, L. 2017. Pore structure of cementitious material enhanced by graphitic nanomaterial: a critical review. *Toxicology and applied pharmacology*. 316 : 114-122.
- Garg, Rishav et al. (2020) „*Experimental study on strength and microstructure of mortar in presence of micro and nano-silica*”, *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), pp. 769–777. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.167>.
- Guler, S., Türkmenoğlu, Z.F. and Ashour, A. (2020) „*Performance of single and hybrid nanoparticles added concrete at ambient and elevated temperatures*”, *Construction and Building Materials*, 250, pp. 27–30. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118847>.
- Hailing Ma, Xin Zhang, Feifei Ju and Sang Bing Tsai, 2018, *A Study on Curing Kinetics of NanoPhase Modified Epoxy Resin*, Publisher's Springer Nature

- Hadiyawarman, Agus Rijal, Bebeh W. Nuryadin, Abdullah Mikrajuddin, dan Khairurrijal, 2008, *Fabrikasi Material Nanokomposit Super kuat, Ringan dan Transparan*, *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*.
- Hamed, Nehal., El-Feky, M.S., Kohail, Mohamed., Nasr, El-Sayed A.R. 2019. Effect of nano-clay de-agglomeration on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 205 : 245 – 256.
- Huseien, G. F., Shah, K. W., Sam, A. R. M. 2019. *Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight*. *Journal of Building Engineering*.
- Huang, Q. et al. (2020) „*Microstructure Change of Nanosilica–Cement Composites Partially Exposed to Sulfate Attack*“, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00401-4>.
- Hospodarova, V., Singovszka, E., Stevulova, N. 2018. *Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials*. *American Journal of Analytical Chemistry*. 9 : 303-310.
- Jian, Z. B., Xing, X. D., Sun, P. C., 2019. The effect of nanoalumina on early hydration and mechanical properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*. 202 : 169-176.
- Kalhuri, H. et al. (2020) „*Experimental study on the influence of the different percentage of nanoparticles on strength and freeze–thaw durability of shotcrete*“, *Construction and Building Materials*, 256, p. 119470. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119470>.
- Kinuthia, J. 2018. Wastepaper sludge ash. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concretes*. 289-321.
- Khan, K. et al. (2022) „*Nano-Silica-Modified Concrete: A Bibliographic Analysis and Comprehensive Review of Material Properties*“, *Nanomaterials*, 12(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/nano12121989>.
- Kiruthika, C., Lavanya Prabha, S. and Neelamegam, M. (2020) „*Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction*“, *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), pp. 1622–1625. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.766>.

Krishnaveni, C., and S. Senthil Selvan. "Study on nano-alumina in concrete." *Materials Today: Proceedings* 46 (2021): 3648-3652.

Kotnarowska, D. (2010) „*Epoxy coating destruction as a result of sulphuric acid aqueous solution action*“, *Progress in Organic Coatings*, 67(3), pp. 324–328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.10.026>.

Kumar, S. et al. (2020) „Characterization, properties and microstructure studies of cement mortar incorporating nano-SiO₂“, *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), pp. 425–430. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.420>.

Kuli, I., Abu, L., T. M., Fini, E. H., and Hamoush, S. A. 2016. The Use of Nano Silica for Improving Mechanical Properties of Hardened Cement Paste. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 9 (1) : 146-154.

Liu, H., Zhan, H., Wang, J., Wei, J. 2020. *Effect of temperature on the size of biosynthesized silver nanoparticle: Deep insight into microscopic kinetics analysis*. *Arabian Journal of Chemistry*. 13 : 1011–1019.

Liu, Min, Hongbo Tan, and Xingyang He. 2019. “Effects of Nano-SiO₂ on Early Strength and Microstructure of Steam-Cured High Volume Fly Ash Cement System.” *Construction and Building Materials* 194: 350–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.214>.

Meng, T., Yu, Y., Qian, X., Zhan, S., Qian, K., 2012. Effect of nano-TiO₂ on the mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 29 : 241-245.

Mao, L., Jin-Man, K. 2019. *A Review of Nanomaterials in Cement-Based Composite*. Recycled Construction Resources Institute. 7(2) : 174-186.

Mohamadi, M. and Choobbasti, A.J. (2021) „*Stabilization of sandy soil using microfine cement and nanosilica grout*“, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(16). Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07844-3>.

Nair, S. R and Rahim, A. 2017. *Effects of Nanomaterial on Concrete*. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 10 (01) : 05-10.

Nodehi, M. (2022) „*Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review*“, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1). Available at: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00661-3>.

- Norhasri, M.S. Muhd., Hamidah, M.S., Fadzil, A. Mohd. 2017. *Applications of using nano material in concrete : A review*. Construction and Building Materials. 133 : 91–97.
- Peter, C. and Karthi, L. (2021) „*Durability of Geopolymer Concrete Exposed to Acidic Environment – A Review*“, Sustainability, Agri, Food and Environmental Research, 10(1), pp. 1–11.
- Prashanth, R. et al. (2019) „*Experimental investigation on corrosion damaged concrete column added with nano silica*“, International Journal of Recent Technology and Engineering, 7(6), pp. 28–32.
- Özcan, A. and Karakoç, M.B. (2019) „*The Resistance of Blast Furnace Slag- and Ferrochrome Slag-Based Geopolymer Concrete Against Acid Attack*“, International Journal of Civil Engineering, 17(10), pp. 1571–1583. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00425-2>.
- Quercia, G., Hüskén, G. and Brouwers, H.J.H. (2012) „*Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste*“, Cement and Concrete Research, 42(2), pp. 344–357. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.008>.
- Sahu, A., Dey, T. and Chakraborty, S. (2021) „*Influence of Nano Silica on Mechanical and Durability Characteristic of Mortar made by Partial Replacement of Natural Fine Aggregate with Recycled Fine Aggregate*“, Silicon, 13(12), pp. 4391–4405. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00688-8>.
- Sanaei Ataabadi, H. et al. (2021) „*Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation*“, Journal of Building Engineering, 34(October), p. 101878. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101878>.
- Samyn, P., Barhoum, A., Ohlund, T and Dufresne, A., 2018. Review: nanoparticles and nanostructured materials in papermaking. *Journal of Materials Science* volume. 53 : 146–184.
- Saloma., Nasution, A., Imran, I, Abdullah, M. 2015. *Improvement Of Concrete Durability By Nanomaterials*. Procedia Engineering, The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). 125 : 608 – 612.

- Septriasyah, V., Saggaff, A. and Saloma (2021) „*Characteristics of nanocomposite polymer with temperature variation and heating time by using simple mixing method*“, International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration, 8(78), pp. 651–661. Available at: <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874037>.
- Singh, L.P. et al. (2019) „*Durability studies of nano-engineered fly ash concrete*’, Construction and Building Materials, 194, pp. 205–215. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.022>.
- Singh, N. P. 2020. *Properties of cementitious systems in presence of nanomaterials. Materials Today: Proceedings*. 29 (4) : 1143-1149
- Sikora, P., Augustyniak, A., Cendrowski, K., Horszczaruk, E., Rucinska, T., Nawrotek, P, and Mijowska, E. 2018. Characterization of Mechanical and Bactericidal Properties of Cement Mortars Containing Waste Glass Aggregate and Nanomaterials. *Journal Materials*. 9(8) : 701-716.
- Tabatabaeian, M., Khaloo, A. and Khaloo, H. (2019) „*An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins*’, Construction and Building Materials, 228, p. 116820. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116820>.
- Valencia-Saavedra, W.G., Mejía de Gutiérrez, R. and Puertas, F. (2020) „*Performance of FA-based geopolymers exposed to acetic and sulfuric acids*’, Construction and Building Materials, 257, p. 119503. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119503>.
- Wedhanto, S. (2017) „*217447-Pengaruh-Air-Laut-Terhadap-Kekuatan-Teka*“, 22(2), pp. 21–30.
- Xu, J. et al. (2021) „*Strength characteristics and prediction of epoxy resin pavement mixture*“, Construction and Building Materials, 283, p. 122682. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122682>.
- Yaping Z, Ying Z, Rongchang N. *Effects of nanoparticles SiO₂ on the performance of nanocomposites*. Materials Letters. 2003; 57:2940-2944.
- Zainul, R. (2016) „*Effect of temperature and particle motion against the ability of ZnO semiconductor photocatalyst in humic acid*“, Der Pharmacia Lettre, 8(15), pp. 120–124.

Zari, N., Raji, M., Mghari, H. E., Bouhfid, R, and Qaiss, A.e. K. 2018. Nanoclay and polymer based nanocomposites: Materials for energy efficiency. *Polymer-based Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*. 75-103.

Zhang J, Xu YC, Huang P. *Effect of cure cycle on curing process and hardness for epoxy resin*. eXPRESS Polymer Letters. 2009; 3(9):534–541.

Zidi, Z., Ltifi, M. and Zafar, I. (2021) „*Comparative study: nanosilica, nanoalumina, and nanozinc oxide addition on the properties of localized geopolymer*“, Journal of the Australian Ceramic Society, 57(3), pp. 783–792. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41779-021-00576-3>.

.