

**PENGEMBANGAN MATERIAL ANTIKOROSI BERBASIS
SiO₂ HASIL EKSTRAKSI LIMBAH KACA DAN
DIMODIFIKASI DENGAN DOPING Ni**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna
Memperoleh Gelar Sarjana Dalam Ilmu Kimia



**Diajukan Oleh
ROHA ARIA WARDANI
NIM 2108036083**

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG**

2025

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Roha Aria Wardani

NIM : 2108036083

Jurusan : Kimia

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul

**PENGEMBANGAN MATERIAL ANTIKOROSI BERBASIS
SiO₂ HASIL EKSTRAKSI LIMBAH KACA DAN
DIMODIFIKASI DENGAN DOPING Ni**

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian/karya saya sendiri, kecuali bagian tertentu yang dirujuk sumbernya.

Semarang, 10 Juni 2025

Pembuat pernyataan,



Roha Aria Wardani

NIM. 2108036083

PENGESAHAN

Naskah skripsi berikut ini:

Judul : **Pengembangan Material Antikoroosi Berbasis SiO_2 Hasil Ekstraksi Limbah Kaca dan Dimodifikasi dengan Doping Ni**

Penulis : Roha Aria Wardani

NIM : 2108036083

Jurusan : Kimia

Telah diajukan dalam sidang tugas akhir oleh Dewan Penguji Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo dan dapat diterima sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana dalam Ilmu Kimia.

Semarang, 14 Juli 2025

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang

Sekretaris Sidang




Wirda Udaibah, M.Si

Kholidah, M.Sc

NIP. 198501042009122003

NIP. 198508112019032008

Penguji I

Penguji II




Dr. Mulyatun, M.Si

Mutista Hafshah, M.Si

NIP. 198305042011012008

NIP. 199401022019032015



Pembimbing



Wirda Udaibah, M.Si

NIP. 198501042009122003

NOTA DINAS

Semarang, 10 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Kimia

Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum wr. wb.

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : **Pengembangan Material Antikorosi Berbasis SiO_2 Hasil Ekstraksi Limbah Kaca dan Dimodifikasi dengan Doping Ni**

Nama : **Roha Aria Wardani**

NIM : 2108036083

Jurusan : Kimia

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang untuk diujikan dalam Sidang Munqasyah.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Pembimbing



Wirda Udaibah, M.Si
NIP. 198501042009122003

ABSTRAK

Korosi merupakan masalah serius yang dapat menimbulkan kerugian baik secara langsung maupun tidak langsung. Pengembangan material antikorosi menjadi hal yang sangat dibutuhkan untuk meningkatkan daya tahan material meskipun sejatinya proses korosi tidak bisa dihilangkan atau dicegah, hanya bisa dikendalikan atau diperlambat proses terjadinya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan pelapis antikorosi berbasis silika yang di doping Ni agar memiliki sifat antikorosi yang lebih baik. Ni-SiO₂ di sintesis menggunakan metode sol-gel. Karakteristik material yang disintesis diuji dengan FTIR dan PSA. Proses pelapisan menggunakan metode *spray coating* dan karakteristik hasil lapisan diamati menggunakan SEM *Cross Section*. Adapun pengujian korosi dilakukan dengan potensiostat. Hasil FTIR menunjukkan bahwa Ni-SiO₂ telah berhasil disintesis, hal ini ditunjukkan karena adanya gugus silanol dan siloksan serta adanya ikatan Ni dengan senyawa silikat. Sedangkan ukuran partikel Ni-SiO₂ berdasarkan pengujian PSA adalah 48,013 mikrometer. Karakterisasi SEM *Cross Section* menunjukkan hasil *coating* masih belum merata karena adanya penumpukan hasil *coating*. Nilai laju korosi pada logam besi yang telah dilapisi Ni-SiO₂ menunjukkan keefektifan material pelapis terutama pada variasi Ni-SiO₂ 15% nilai laju korosinya sebesar 0,01036 mm/year dengan tingkat efisiensi inhibisi korosi yang sangat tinggi yaitu 97,82%. Tingginya efisiensi ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung yang terbentuk sangat efektif baik secara fisik maupun elektrokimia.

Kata Kunci: Korosi, Silika, Doping Ni, Pelapis Antikorosi

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Pengembangan Material Antikorosi Berbasis SiO_2 Hasil Ekstraksi Limbah Kaca dan Dimodifikasi dengan Doping Ni” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.

Skripsi ini disusun sebagai bentuk kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan. Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis Ni-SiO₂ sebagai material pelapis antikorosi. Penyusunan skripsi ini tentu tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Nizar, M.Ag., Rektor Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.
2. Prof. Dr. H. Musahadi, M.Ag., Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo.
3. Dr. Mulyatun, M.Si., Ketua Program Studi Kimia Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.

4. Wirda Udaibah, M.Si., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi selama proses penelitian dan penulisan skripsi.
5. Segenap Dosen, Pegawai dan Civitas Akademik Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan dan pemahaman.
6. Keluarga tercinta yang selalu memberikan dukungan moral, doa, dan semangat yang tak henti-hentinya.
7. Teman-teman seperjuangan dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan semangat dan bantuan selama proses penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi referensi dalam pengembangan penelitian selanjutnya.

Semarang, 10 Juni 2025

Penulis



Roha Aria Wardani
NIM. 2108036083

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
PENGESAHAN	iii
NOTA DINAS	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah	9
C. Tujuan Penelitian	10
D. Manfaat Penelitian	10
BAB 2 LANDASAN PUSTAKA.....	11
A. Limbah Kaca	11
B. Silika.....	13
C. Nikel.....	15
D. Metode Sol-Gel.....	16
E. <i>Spray Coating</i>	18
F. Korosi	19
G. Laju Korosi	21
H. FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>).....	24
I. Potensiostat	26

J.	SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>	28
K.	PSA (<i>Particle Size Analyzer</i>)	30
L.	Kajian Pustaka	31
BAB 3 METODE PENELITIAN		37
A.	Tempat Dan Waktu Penelitian	37
B.	Alat Dan Bahan	37
C.	Prosedur Penelitian	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		47
A.	Sintesis Ni-SiO ₂	47
B.	Pelapisan Ni-SiO ₂ pada Logam Besi	59
C.	Sifat Antikorosi Pelapis Ni-SiO ₂	65
BAB 5 PENUTUP		71
A.	Kesimpulan	71
B.	Saran	72
DAFTAR PUSTAKA		74
LAMPIRAN		86
RIWAYAT HIDUP		97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Limbah Kaca.....	12
Gambar 2. 2. Deret Volta.....	16
Gambar 2. 3. Proses Coating Menggunakan Spray Gun (Wu <i>et al.</i> , 2023).....	19
Gambar 2. 4. Spektra FTIR dari (a) Silika Gel Kiesel G-60 dan (b) Silika Gel Sintesis (Azmiyawati <i>et al.</i> , 2019).....	25
Gambar 2. 5. Plot Tafel Hasil Pengujian Baja Coating Nanopartikel Silika dalam 1% HCl dan Larutan NaCl 3.5% (Rajkumar <i>et al.</i> , 2019).....	28
Gambar 2. 6. Struktur Penampang Melintang Logam yang di <i>Coating</i> (Saptari <i>et al.</i> , 2018).....	30
Gambar 2. 7. Histogram Ukuran Partikel Silika dari Sekam Padi (Pradeepkumar <i>et al.</i> , 2023).....	31
Gambar 3. 1. Proses Pelapisan Ni-SiO ₂ pada Logam Besi (Penulis).....	43
Gambar 3. 2. Rangkaian Alat Potensiostat (Penulis).....	44
Gambar 4. 1. (a). Limbah Sisa Potongan Kaca dan (b). Limbah Kaca Serbuk.....	47
Gambar 4. 2. Reaksi Kondensasi (A'yuni <i>et al.</i> , 2023).....	50
Gambar 4. 3. Silika dari Limbah Kaca.....	50
Gambar 4. 4. Spektrum FTIR Silika Gel.....	51
Gambar 4. 5. Distribusi Ukuran Partikel Silika.....	53
Gambar 4. 6. Spektrum FTIR Ni-SiO ₂ 15%.....	58

Gambar 4. 7. Ni-SiO ₂ 5%, Ni-SiO ₂ 10% dan Ni-SiO ₂ 15%.....	58
Gambar 4. 8. Logam Besi Sebelum Dilapisi Gel Silika.....	60
Gambar 4. 9. Logam Besi Setelah Dilapisi Gel Silika.....	61
Gambar 4. 10. Logam Besi Setelah Dilapisi Ni-SiO ₂	63
Gambar 4. 11. Logam Besi Coating Ni-SiO ₂ 15%.....	64
Gambar 4. 12. Logam Besi Coating Ni-SiO ₂ 15% Setelah Proses Korosi.....	65
Gambar 4. 13. Kurva Tafel Pengujian Korosi.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Komposisi Limbah Kaca (Suharto <i>et al.</i> , 2021).....	13
Tabel 2. 2. Nilai Tingkat Ketahanan Berdasarkan Laju Korosi.....	22
Tabel 2. 3. Interpretasi Spektrum Silika Gel Kiesel G-60 dan Silika Gel Sintesis (Azmiyawati <i>et al.</i> , 2019).....	25
Tabel 2. 4. Hasil Pengujian Korosi pada Baja (Rajkumar <i>et al.</i> , 2019).....	28
Tabel 4. 1. Interpretasi Serapan FTIR Silika Gel Hasil Sintesis dan Kiesel Gel 60 (Anisara <i>et al.</i> , 2024).....	52
Tabel 4. 2. Persentase Distribusi Diameter Ukuran Partikel.....	54
Tabel 4. 3. Nilai Laju Korosi.....	68
Tabel 4. 4. Efisiensi Inhibisi.....	70

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Diagram Alir Sintesis Silika dari Limbah Kaca.....	86
Lampiran 2 Diagram Alir Sintesis Ni-SiO ₂	87
Lampiran 3 Proses Pelapisan Logam Fe.....	88
Lampiran 4 Rangkaian Alat Uji Korosi.....	89
Lampiran 5 Perhitungan Penambahan Doping Ni.....	90
Lampiran 6 Perhitungan Nilai Span.....	92
Lampiran 7 Perhitungan Efisiensi Inhibisi Korosi.....	93
Lampiran 8 Dokumentasi Penelitian.....	94

BAB 1

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Permasalahan korosi di Indonesia perlu mendapatkan perhatian serius. Korosi merupakan proses kimiawi yang sangat merugikan karena dapat mengurangi ketahanan sifat material yang sedang digunakan bahkan mampu menyebabkan kerugian baik secara langsung maupun tidak langsung. Kerugian langsung mencakup kerusakan pada peralatan, mesin, atau struktur bangunan, sedangkan kerugian tidak langsung melibatkan berhentinya aktivitas produksi karena penggantian peralatan yang rusak akibat korosi. Bahkan, kerugian tidak langsung bisa berakibat fatal, seperti kebocoran pipa gas di Dumai, Riau, pada tahun 2021 menyebabkan tumpahan minyak yang mencapai 8,4 barel. Penyebab kecelakaan ini adalah korosi pada pipa gas yang disebabkan oleh kandungan asam dalam tanah (Ridwan, 2021). Kebocoran pipa penyaluran air baku milik PDAM Tirta Manggar yang diakibatkan korosi menyebabkan 40% pelayanan air bersih di Kecamatan Balikpapan Selatan, Balikpapan Kota, sebagian Balikpapan Tengah dan Balikpapan Barat mengalami gangguan (Hendra, 2018). Robohnya gedung di Jalan Brigjen Katamso, Kota Bambu Selatan, Palmerah,

Jakarta Barat disebabkan oleh korosi pada pondasi besi karena ada air yang masuk dari celah-celah beton sehingga sambungan-sambungan tiang itu telah mengalami pelapukan (Ladjar, 2020). Jembatan Mahakam yang terletak di Tenggarong, Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur ambruk pada 26 November 2011 menyebabkan puluhan orang yang melintas di atasnya meninggal dunia dan sebagian lainnya mengalami luka-luka. Ambruknya jembatan ini karena retakan pada sistem sambungan akibat karat (Dzulfaroh, 2019).

Korosi dapat terjadi dengan lebih cepat karena beberapa faktor seperti kadar air di sekitar logam (bisa dalam bentuk air maupun uap air), keberadaan zat pengotor seperti debu, cairan, dan lumpur, kontak dengan elektrolit, temperatur, pH, permukaan logam yang tidak rata, terbentuknya sel elektrokimia dan adanya mikroba pada permukaan logam (Wasim *et al.*, 2018). Di Indonesia, iklim yang lembap dan berawan sepanjang tahun dapat mempercepat terjadinya korosi pada logam. Indonesia juga memiliki banyak daerah yang beriklim tropis dengan curah hujan yang tinggi apalagi dua pertiga wilayahnya berupa lautan, sehingga kelembapan udara di daerah tersebut juga tinggi. Kelembapan udara yang tinggi dapat mempercepat terjadinya korosi pada logam karena

meningkatkan kadar uap air di sekitar logam (Putra, 2018). Selain itu, fenomena hujan asam dapat menyebabkan korosi karena mengandung sedimen basah yang bersifat asam dengan nilai pH kurang dari 5,6. Ini disebabkan oleh adanya gas-gas pengasam terlarut seperti sulfur dioksida dan nitrogen dioksida. Ketika logam terpapar presipitasi asam ini, seperti pada kabel, jembatan, dan kendaraan, mereka mengalami korosi yang mengarah pada degradasi material dan hilangnya kekuatan mekanis (Martinović *et al.*, 2021).

Pengembangan material antikorosi menjadi hal yang sangat dibutuhkan untuk meningkatkan daya tahan material meskipun sejatinya proses korosi tidak bisa dihilangkan atau dicegah, hanya bisa dikendalikan atau diperlambat proses terjadinya. Seperti yang dijelaskan dalam surat Al-An'am ayat 48:

وَمَا نُرْسِلُ الْمُرْسَلِينَ إِلَّا مُبَشِّرِينَ وَمُنذِرِينَ ۚ فَمَنْ ءَامَنَ وَأَصْلَحَ فَلَا
خَوْفٌ عَلَيْهِمْ وَلَا هُمْ يَحْزَنُونَ

Artinya: "Dan tidaklah Kami mengutus para rasul itu melainkan untuk memberikan kabar gembira dan memberi peringatan. Barangsiapa yang beriman dan mengadakan perbaikan, maka tak ada kekhawatiran terhadap mereka dan tidak pula mereka bersedih hati."

Ayat ini menjelaskan bahwa manusia yang hidup di muka bumi memiliki potensi dan tanggung jawab untuk mengelola serta memperbaiki kondisi bumi, termasuk menangani berbagai bentuk kerusakan yang terjadi. Oleh karena itu, manusia tidak seharusnya membiarkan kerusakan tersebut berlangsung lama tanpa upaya perbaikan yang nyata (Prayoga, 2023).

Beberapa material antikorosi yang telah dikembangkan meliputi *stainless steel* yang terdiri dari kromium dan besi, sering disebut juga dengan baja tahan karat. Namun, kromium yang digunakan dalam pelapis anti-korosi dapat menimbulkan efek berbahaya, termasuk menyebabkan kerusakan genetik (*genotoksitas*) dan stres oksidatif pada pekerja yang terpapar. Kromium juga berpotensi menyebabkan kanker paru-paru, terutama bagi mereka yang bekerja di industri produksi bahan kimia kromium. Selain risiko kesehatan, ada juga masalah lingkungan yang terkait dengan penggunaan senyawa kromium (Gharbi *et al.*, 2018). Aluminium juga memiliki ketahanan terhadap korosi, akan tetapi karena bobotnya yang ringan aluminium mudah mengalami deformasi dan memiliki ketahanan oksidasi yang rendah pada suhu tinggi (Azmi, 2018). Titanium adalah logam yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi bahkan dalam kondisi korosif

(Shucaí *et al.*, 2019) tapi penggunaan titanium sebagai material antikorosi dinilai kurang efisien karena harganya yang mahal membuatnya kurang ideal untuk aplikasi industri berskala besar (Reddy *et al.*, 2021). Selain logam, material keramik juga berpotensi untuk digunakan sebagai material antikorosi. Keunggulan pelapis antikorosi dari keramik dibandingkan logam yaitu mengurangi panas pada komponen bersuhu tinggi, tahan terhadap udara dan kelembaban, lapisan permukaannya halus sehingga dapat memperbaiki tampilan permukaan serta mampu menghambat proses korosi akibat asam dan suhu tinggi dengan baik (Fan *et al.*, 2023). Salah satu material keramik yang dapat digunakan sebagai pelapis antikorosi adalah silika. Silika merupakan bahan yang menjanjikan untuk perlindungan korosi karena stabilitas kimiawi, sifat tidak beracun, dan keserbagunaannya dalam membentuk lapisan. Pelapis berbasis silika dapat memberikan penghalang fisik yang mencegah zat korosif mencapai permukaan logam (Figueira, 2020).

Silika adalah senyawa yang sangat melimpah dengan kandungan rata-rata mencapai 28% dari kerak bumi. Sumber utama silika di alam meliputi mineral silikat, pasir, dan batuan. Selain itu, silika juga dapat ditemukan dalam bentuk gel silika, yang memiliki struktur berpori

tinggi dan mampu menyerap kelembapan. Kuarsa adalah bentuk silika yang paling umum ditemukan di alam dan digunakan dalam jumlah besar (Souri *et al.*, 2021). Meskipun silika tersedia cukup besar di alam, pada penelitian ini digunakan limbah kaca sebagai bahan baku sintesis SiO_2 . Hal ini karena di Indonesia limbah kaca masih menjadi salah satu jenis sampah yang sulit diurai oleh tanah dan membutuhkan waktu yang lama untuk terurai dengan sendirinya. Sayangnya, daur ulang limbah kaca masih menjadi hal yang langka dilakukan di Indonesia. Berdasarkan data statistik Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada tahun 2023, limbah kaca di Indonesia mencapai 2,47% dari total sampah yang ada. Kandungan SiO_2 yang tinggi dalam limbah kaca dapat dimanfaatkan dan diolah menjadi silika gel melalui proses pembentukan natrium silikat. Natrium silikat ini diperoleh dari reaksi antara SiO_2 dalam limbah kaca dengan natrium hidroksida (NaOH). Larutan natrium silikat yang terbentuk kemudian direaksikan dengan asam untuk menghasilkan asam silikat, yang selanjutnya mengalami polimerisasi menjadi silika gel (A'yuni *et al.*, 2023). Dengan memanfaatkan limbah kaca, dapat membantu mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan dan memperpanjang umur pakai kaca.

Silika yang digunakan sebagai pelapis antikorosi dapat mengalami degradasi berupa retakan atau kerusakan setelah pemaparan jangka panjang terhadap media korosif, sehingga meningkatkan risiko terjadinya korosi pada permukaan yang dilindungi (Gautam *et al.*, 2022). Ada beberapa cara untuk mengatasi masalah keretakan pada lapisan antikorosi berbasis silika. Salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah keretakan adalah dengan menggunakan nanopartikel silika mesopori. Partikel silika yang sangat kecil dan berpori ini dapat mengisi celah-celah kecil pada lapisan antikorosi, sehingga memperkuat lapisan tersebut dan meningkatkan ketahanannya terhadap kerusakan (Liu *et al.*, 2022). Selain itu, untuk mengatasi kelemahan ini dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti penambahan pigmen penghambat, bahan pengisi dan aditif ke dalam matriks sol-gel serta pengembangan lapisan yang dapat memperbaiki diri sendiri menggunakan *self-healing materials*. *Self-healing materials* adalah bahan yang dapat dilepaskan secara otomatis untuk memperbaiki kerusakan pada lapisan pelindung ketika terjadi cacat atau kerusakan (Gautam *et al.*, 2022). Penambahan bahan pengisi dan inhibitor korosi ke dalam matriks pelapis telah terbukti secara signifikan meningkatkan ketahanan korosi pelapis

dan meningkatkan masa pakai pada kondisi korosif sekalipun (Liu *et al.*, 2022).

Pada penelitian ini digunakan doping Ni sebagai bahan pengisi karena Ni memiliki sifat antikorosi yang baik dan dapat berikatan dengan silika (Mladenović *et al.*, 2024). Partikel nikel didispersikan dalam matriks silika untuk meningkatkan sifat mekanik atau ketahanan terhadap korosi. Nikel efektif sebagai pelapis antikorosi karena posisinya dalam deret Volta lebih ke kanan dibanding besi dan seng, dengan potensial elektroda standar sekitar $-0,25$ V (Callister, 2018). Hal ini menunjukkan bahwa nikel lebih sulit teroksidasi dan lebih stabil terhadap korosi. Nikel merupakan material yang tahan korosi karena kemampuannya membentuk lapisan oksida pasif pada permukaannya (Larsson, 2023). Lapisan oksida ini bertindak sebagai penghalang antara logam dengan lingkungan untuk mencegah korosi lebih lanjut. Lapisan oksida stabil yang melekat dengan baik pada permukaan logam memberikan perlindungan jangka panjang terhadap korosi. Lapisan oksida pasif pada nikel terbentuk akibat reaksi nikel dengan oksigen di udara. Selain kemampuannya membentuk lapisan oksida pasif, nikel juga tahan terhadap banyak lingkungan korosif, termasuk asam, basa dan air laut (Larsson, 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, silika yang di doping Nikel memiliki potensi sebagai pelapis antikorosi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan pelapis antikorosi berbasis silika yang memiliki sifat antikorosi yang lebih baik. Silika yang dimodifikasi nikel memiliki sifat antikorosi yang lebih baik karena adanya nikel yang dapat membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi industri manufaktur dan konstruksi di berbagai aplikasi, seperti perlindungan baja, aluminium, dan besi.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik material Ni-SiO_2 hasil sintesis?
2. Bagaimana karakteristik Ni-SiO_2 yang dilapiskan pada logam besi?
3. Bagaimana kemampuan atau kinerja antikorosi dari material Ni-SiO_2 pada logam?

C. Tujuan Penelitian

1. Menentukan karakteristik material Ni-SiO₂ hasil sintesis.
2. Menentukan karakteristik Ni-SiO₂ yang dilapiskan pada logam besi.
3. Mengetahui kinerja antikorosi dari material Ni-SiO₂ pada logam.

D. Manfaat Penelitian

1. Dapat menghasilkan pelapis antikorosi yang ramah lingkungan.
2. Mampu meningkatkan ketahanan korosi material.
3. Mengurangi pencemaran lingkungan dengan memanfaatkan limbah kaca menjadi bahan baku yang lebih bermanfaat.
4. Dapat berperan aktif dalam pengembangan ilmu kimia

BAB 2

LANDASAN PUSTAKA

A. Limbah Kaca

Limbah merupakan bahan sisa atau buangan yang tidak lagi digunakan yang dihasilkan dari aktivitas manusia, baik pada skala rumah tangga, industri, maupun pertambangan. Dalam jumlah tertentu, limbah dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan serta kesehatan manusia, sehingga penanganan yang tepat terhadap limbah sangat diperlukan. Berdasarkan dampaknya limbah dibagi menjadi tiga, limbah organik yang mudah terurai secara alami oleh mikroorganisme, seperti sisa makanan dan limbah tanaman, limbah anorganik yang sulit terurai secara alami dan membutuhkan waktu yang sangat lama untuk terurai, seperti plastik, kaca, dan logam serta limbah berbahaya yang memiliki sifat berbahaya dan beracun, seperti limbah B3 (Sunarsih, 2014).



Gambar 2. 1. Limbah Kaca

Berdasarkan SNI 3242:2008, limbah anorganik adalah jenis limbah yang sulit membusuk atau merupakan limbah kering, karena sifatnya yang tidak dapat terurai secara alami atau tidak *biodegradable*, limbah anorganik tidak boleh dibuang sembarangan ke lingkungan karena dapat mengganggu keseimbangan ekosistem. Pengelolaan yang tidak tepat terhadap limbah anorganik dapat menyebabkan penurunan kualitas kesehatan, menurunnya kualitas lingkungan, serta berdampak negatif pada aspek sosial dan ekonomi masyarakat (Azmiyati *et al.*, 2021).

Limbah kaca seperti pada Gambar 2.1 merupakan limbah anorganik yang melimpah, mencapai 0,7 juta ton per tahun di Indonesia. Sebagian besar berasal dari botol, limbah kaca bangunan, dan kaca dapur. Komposisi penyusun limbah kaca pada umumnya seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Komposisi Limbah Kaca (Suharto *et al.*, 2021)

Komponen Penyusun	Jumlah (%)
SiO ₂	73,8
CaO	16,8
Fe ₂ O ₃	3,4
MgO	2,3
Al ₂ O ₃	2
P ₂ O ₅	1
K ₂ O	0,3
TiO ₂	0,2
MnO	0,1

Kandungan SiO₂ yang tinggi dalam limbah kaca memberikan potensi untuk diolah menjadi silika gel. Selain itu, pemanfaatan limbah kaca menjadi silika gel dapat memberikan dampak positif terhadap lingkungan karena meningkatkan masa pakai kaca sehingga mengurangi jumlah limbah yang sulit terurai (Ramadani, 2018).

B. Silika

Silika termasuk dalam logam oksida golongan IV yang memiliki ketahanan terhadap abrasi, bersifat isolator listrik, serta memiliki stabilitas termal yang tinggi. Struktur ikatan silika berbentuk koordinasi tetrahedral, dengan

satu atom silikon (Si) di pusat dan dikelilingi oleh empat atom oksigen (O). Silika (SiO_2) adalah senyawa yang muncul secara alami dalam berbagai bentuk, termasuk kuarsa, pasir, dan berbagai jenis batuan. Silika merupakan salah satu mineral yang paling melimpah di kerak bumi. Silika sering digunakan dalam industri untuk produksi kaca, bahan konstruksi, dan sebagai pengisi karet serta plastik. Dalam konteks yang lebih luas, silika memiliki peran penting dalam penelitian material canggih karena sifatnya yang unik, seperti stabilitas termal yang tinggi, kekerasan, dan kelembaman kimiawi (Martin, 2013). Silika dapat ditemukan dalam tiga fasa utama, yaitu kristalin, amorf dan gel (Oscik, 1982). Selain tiga fasa utama tersebut, silika juga dapat ditemukan dalam bentuk nanokristalin dan *mesoporous*.

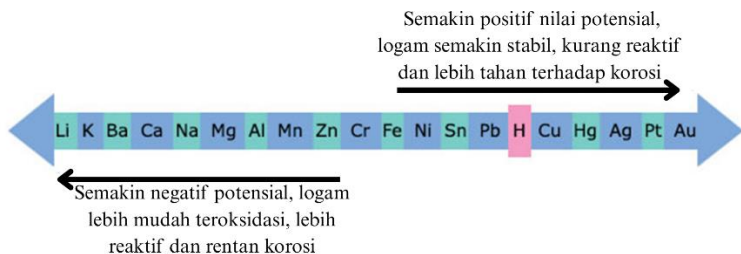
Silika dapat digunakan sebagai pelapis antikorosi pada logam dengan cara membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam yang berhubungan langsung dengan larutan korosif. Silika dapat digunakan sebagai bahan antikorosi karena ketika diaplikasikan pada substrat logam, silika membentuk ikatan kimia dengan permukaan logam, memberikan sifat *adhesi* dan penghalang yang membatasi masuknya media asing (Gautam *et al.*, 2022).

C. Nikel

Nikel merupakan logam berwarna perak yang pertama kali ditemukan sekitar tahun 1751, meskipun penggunaannya dalam paduan logam sudah berlangsung sejak zaman dahulu. Nikel dikenal memiliki ketahanan korosi yang tinggi di atmosfer. Selain itu, nikel juga tahan terhadap sebagian besar jenis asam, termasuk asam pengoksidasi seperti asam nitrit. Bijih nikel terdiri dari nikel sulfida dan nikel oksida. Logam ini banyak dimanfaatkan dalam pembuatan berbagai jenis paduan yang populer, seperti *stainless steel*, baja paduan (*alloy steel*) dan logam *non-ferrous* (Brady, 2002).

Nikel merupakan salah satu logam yang efektif digunakan sebagai pelapis antikorosi, dan efektivitas ini dapat dijelaskan melalui posisinya dalam deret Volta seperti pada Gambar 2.2. Dalam deret elektrokimia, nikel memiliki potensial elektroda standar sebesar sekitar $-0,25$ V, yang berarti posisinya lebih ke kanan dibanding logam-logam seperti besi ($-0,44$ V) dan seng ($-0,76$ V) (Callister, 2018). Posisi ini menunjukkan bahwa nikel memiliki kecenderungan oksidasi yang lebih rendah, sehingga lebih stabil terhadap korosi. Ketika digunakan sebagai pelapis, nikel tidak memberikan perlindungan dengan cara mengorbankan dirinya (seperti halnya seng pada proteksi

katodik), melainkan melindungi secara pasif (Nasution, 2019). Perlindungan ini terjadi karena nikel membentuk lapisan padat yang mampu menghambat kontak antara logam dasar dan lingkungan korosif seperti udara, air atau ion klorida (Larsson, 2023). Selain itu, nikel juga mampu membentuk lapisan oksida tipis yang stabil, seperti NiO atau Ni(OH)_2 , yang turut memperkuat ketahanan terhadap korosi (Hidayat, 2017).



Gambar 2. 2. Deret Volta

D. Metode Sol-Gel

Metode sol-gel adalah suatu teknik kimia yang digunakan untuk sintesis material, terutama untuk menghasilkan nanopartikel dan bahan keramik. Proses ini melibatkan dua tahap utama: pembentukan "sol" (larutan koloid) dan konversi sol tersebut menjadi "gel". Pada tahap pertama, prekursor yang larut dalam pelarut dicampurkan dan mengalami reaksi kimia, yang menghasilkan partikel

kecil yang terdispersi dalam larutan. Ketika kondisi tertentu diubah (seperti pH atau konsentrasi), sol akan bertransisi menjadi gel, yang merupakan jaringan tiga dimensi yang mengandung pelarut. Setelah gel terbentuk, pelarut dapat dihilangkan melalui proses pengeringan, yang dapat dilakukan dengan berbagai metode, termasuk pengeringan superkritis untuk menghasilkan aerogel yang sangat berpori. Metode sol-gel memiliki beberapa keunggulan, seperti kemampuan untuk mengontrol komposisi kimia, menghasilkan material dengan ukuran partikel yang seragam, dan melakukan sintesis pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional lainnya. Metode ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam bidang optik, elektronik, dan material komposit (Bokov *et al.*, 2021).

Metode sol-gel adalah teknik sintesis material yang sangat efektif untuk memproduksi material dengan kemurnian tinggi dan kontrol komposisi kimia yang sangat baik, termasuk untuk proses doping. Doping adalah proses penambahan sejumlah kecil atom asing (*impurity*) ke dalam struktur kristal suatu bahan murni. Atom-atom asing ini yang disebut dopan, dopan akan terdispersi secara homogen dalam matriks material selama proses sol-gel. Doping pada material dilakukan untuk memodifikasi

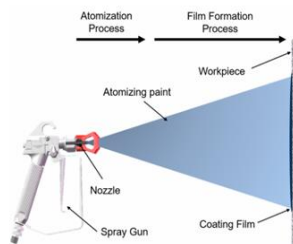
sifat-sifat material, seperti sifat optik, elektronik, atau katalitik (John *et al.*, 2021).

Doping dalam konteks material antikorosi adalah proses penambahan unsur atau senyawa tertentu ke dalam material untuk meningkatkan sifat korosinya. Dalam banyak kasus, doping digunakan untuk memperbaiki sifat mekanis dan kimia dari suatu material, sehingga meningkatkan resistansi terhadap lingkungan yang korosif. Dengan doping, sifat antikorosi material dapat ditingkatkan untuk aplikasi dalam lingkungan ekstrem, seperti industri maritim, minyak dan gas serta manufaktur (Xu *et al.*, 2020).

E. *Spray Coating*

Spray coating adalah metode aplikasi lapisan pelindung atau dekoratif pada permukaan dengan menggunakan teknik penyemprotan seperti pada Gambar 2.3. Metode ini sering digunakan dalam berbagai industri, termasuk otomotif, konstruksi, dan peralatan, untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pelapisan. Dalam proses *spray coating*, cat atau bahan pelapis lainnya disemprotkan ke permukaan menggunakan alat seperti sprayer udara, sprayer elektrostatis, atau sprayer tanpa udara (*airless*). Teknik ini memiliki beberapa keuntungan,

seperti kualitas lapisan yang baik, efisiensi tinggi, dan kemampuan untuk mengatasi permukaan yang kompleks. Teknik *spray coating* sering digunakan dalam pelapisan antikorosi karena keefektifannya dalam melindungi permukaan logam dan material lainnya dari kerusakan akibat korosi (Wu et al., 2023).



Gambar 2. 3. Proses *Coating* Menggunakan *Spray Gun* (Wu et al., 2023)

F. Korosi

Korosi merupakan proses perubahan warna, penurunan mutu atau kerusakan material yang disebabkan oleh reaksi kimia atau elektrokimia berupa reaksi reduksi-oksidasi antara material dengan zat korosif di sekitarnya. Korosi lebih dikenal dengan istilah karat, yang umumnya terlihat sebagai warna cokelat pada besi, baja dan logam paduan lainnya. Sementara itu, korosi pada logam yang mengandung belerang menghasilkan warna hijau dan pada logam seng menghasilkan produk korosi berwarna putih

(Gapsari, 2017). Korosi adalah suatu proses reaksi antara suatu materi (umumnya logam) dengan zat-zat di sekitarnya (biasanya berasal dari lingkungan atau media yang bersifat korosif), yang terjadi melalui reaksi kimia atau elektrokimia. Reaksi ini menyebabkan logam melepaskan elektron dan pada akhirnya mengalami penurunan kualitas.

Korosi atau perkaratan merupakan fenomena yang sangat umum terjadi pada besi. Besi adalah logam yang rentan mengalami karat. Karat pada besi adalah hasil dari proses korosi berupa zat padat berwarna coklat kemerahan yang bersifat rapuh dan berpori. Secara umum, korosi merupakan proses pelepasan elektron dari logam (seperti besi atau baja) yang berada dalam larutan elektrolit, contohnya air laut. Korosi menyebabkan berbagai kerugian karena memperpendek umur material atau konstruksi yang terbuat dari besi maupun baja. Meski demikian, korosi dapat dicegah melalui beberapa metode seperti pengecatan, penggunaan inhibitor, dan pelapisan permukaan (Darmawi *et al.*, 2022).

Berdasarkan kondisi lingkungan korosi dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu korosi pada lingkungan basah dan korosi pada lingkungan kering. Korosi basah pada logam ataupun paduannya terbentuk

akibat reaksi dengan lingkungan yang berada didalam larutan atau cairan. Larutan dengan adanya kandungan Cl^- dan SO_4^{2-} merupakan dua contoh larutan korosif yang sangat agresif dalam menyebabkan korosi pada logam. Korosi basah biasanya disebut dengan korosi *electrochemical*. Sedangkan korosi kering lingkungan korosinya merupakan lingkungan yang bergas (misal pipa penyalur gas), lingkungan bertemperatur tinggi atau perpaduan dari keduanya (temperatur tinggi dengan gas reaktif). Korosi kering biasanya disebut dengan chemical corrosion (Silla, 2003).

G. Laju Korosi

Laju korosi merupakan proses penyebaran atau perkembangan korosi pada suatu material. Dalam berbagai uji korosi, pengukuran laju korosi menjadi parameter yang paling umum dilakukan. Hal ini karena laju korosi sangat berkaitan dengan aspek teknis dan nilai ekonomis suatu material. Laju korosi digunakan sebagai indikator untuk menilai ketahanan material terhadap korosi, sehingga dapat diperkirakan masa pakai material tersebut. Satuan yang digunakan untuk mengukur laju korosi adalah mpy (*mils per year*). Ketahanan korosi biasanya berada dalam rentang laju korosi antara 1 hingga 200 mpy. Tabel 2.2

menunjukkan klasifikasi tingkat ketahanan material berdasarkan nilai laju korosinya (Fontana, 1987).

Tabel 2. 2. Nilai Tingkat Ketahanan Berdasarkan Laju Korosi

<i>Relative Corrosion Resistance</i>	<i>mpy</i>	<i>mm/ year</i>	<i>μm/ year</i>	<i>nm/ year</i>	<i>pm/ year</i>
<i>Outstanding</i>	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
<i>Excellent</i>	1-5	0.02- 0.1	25- 100	2-10	1-5
<i>Good</i>	5-20	0.1-0.5	100- 500	10- 50	5-20
<i>Fair</i>	20- 50	0.5-1	500- 1000	50- 100	20- 50
<i>Poor</i>	50- 200	1-5	1000- 5000	150- 500	50- 200
<i>Unacceptable</i>	20+	5+	5000+	500 +	200 +

Perhitungan laju korosi umumnya dilakukan dengan dua metode, yaitu metode kehilangan berat dan metode elektrokimia. Metode kehilangan berat dilakukan dengan mengukur penurunan massa material akibat proses korosi. Metode ini memerlukan periode waktu tertentu dalam pengujian hingga diperoleh nilai kehilangan massa akibat korosi. Untuk menentukan

besarnya kehilangan berat tersebut, digunakan rumus sebagai berikut:

$$Mpy = \frac{W}{D A T} \quad (2.1)$$

Keterangan:

Mpy: *mils per year*

W: berat yang hilang (gr)

D: massa jenis spesimen (gr/cm^3)

A: luas specimen (cm)

T: waktu yang diperlukan

Metode elektrokimia merupakan cara untuk mengukur laju korosi dengan mencatat perbedaan potensial pada objek uji hingga diperoleh nilai laju korosi. Pengukuran ini dilakukan hanya pada saat proses pengujian berlangsung dan digunakan untuk memperkirakan laju korosi dalam jangka waktu yang lebih panjang, meskipun hasilnya dapat bervariasi dari waktu ke waktu. Metode ini didasarkan pada Hukum *Faraday* dalam perhitungannya (ASTM, 2003) yaitu menggunakan rumus sebagai berikut:

$$K \frac{ai}{nD} \quad (2.2)$$

Keterangan:

Laju korosi dengan satuan *mm/year* atau *mmpy*

a: berat atom logam yang terkorosi (gr/mol)

i (ikorr): kerapatan arus ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

K: konstanta (0.129 untuk satuan mpy dan 0.00327 untuk satuan mmpy)

n: jumlah elektron yang dilepas pada logam terkorosi

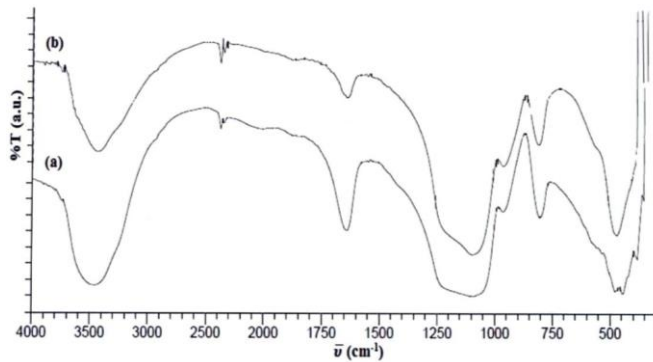
D: massa jenis logam terkorosi (gr/cm^3)

Konversi:

$$1 \text{ mpy} = 0.0254 \text{ mm/yr} = 25.4 \mu\text{m/yr} = 2.90 \text{ nm/yr} = 0.805 \text{ pm/SG}$$

H. FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)

FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) adalah suatu alat yang mengidentifikasi suatu senyawa baik alami maupun buatan dilihat dari spektrum inframerah. Pada penelitian ini, FTIR digunakan untuk melihat gugus fungsi silanol (Si-O-H) dan siloksan (Si-O-Si) pada silika gel seperti pada Gambar 2.4 dan Tabel 2.3.



Gambar 2. 4. Spektra FTIR dari (a) Silika Gel Kiesel G-60 dan (b) Silika Gel Sintesis (Azmiyawati *et al.*, 2019)

Tabel 2. 3. Interpretasi Spektrum Silika Gel Kiesel G-60 dan Silika Gel Sintesis (Azmiyawati *et al.*, 2019)

Silika Gel Kiesel G-60	Silika Gel Sintesis	Interpretasi
3415,7 cm ⁻¹	3433,1 cm ⁻¹	Getatan peregangan -OH dan H ₂ O
1629,7 cm ⁻¹	1639,4 cm ⁻¹	Getaran lentur -OH dan H ₂ O
1097,4 cm ⁻¹	1087,8 cm ⁻¹	Getaran asimetri Si-O yang membentang dari Si-O-Si
956,69 cm ⁻¹	956,69 cm ⁻¹	Getaran peregangan -OH dan Si-OH
800,4 cm ⁻¹	794,6 cm ⁻¹	Getaran dari peregangan simetri Si-O dari Si-O-Si
451,3 cm ⁻¹	470,6 cm ⁻¹	Getaran lentur Si-O-Si

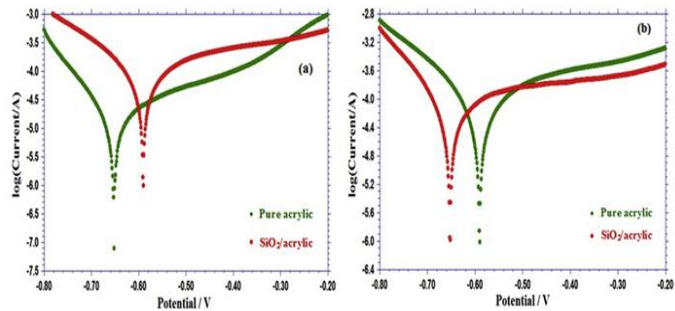
Prinsip kerja FTIR adalah dengan membagi sinar inframerah menjadi dua berkas yang kemudian digabungkan kembali untuk menghasilkan pola interferensi. Salah satu berkas dipantulkan oleh cermin tetap, sementara yang lain dipantulkan oleh cermin yang bergerak secara terus-menerus. Perbedaan jarak tempuh kedua berkas ini menciptakan pola interferensi yang unik. Sinyal interferensi yang dihasilkan kemudian diubah menjadi spektrum inframerah melalui transformasi *Fourier*. Spektrum ini menunjukkan absorbansi atau transmitansi sampel pada berbagai panjang gelombang, sehingga memungkinkan identifikasi senyawa kimia berdasarkan karakteristik pita serapannya (Tkachenko *et al.*, 2022).

I. Potensiostat

Potentiostat adalah perangkat yang digunakan dalam elektrokimia untuk mengendalikan dan mengukur tegangan antara dua elektroda dalam sistem elektrokimia. Fungsinya adalah untuk mempertahankan potensi elektroda kerja (*working electrode*) pada nilai yang telah ditetapkan, sementara arus yang mengalir melalui sistem diukur. Alat ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pengujian korosi, analisis voltametri, dan

penelitian mengenai reaksi elektrokimia. Dalam pengujian korosi, potentiostat melakukan pemindaian polarisasi (*polarization scan*) untuk menilai karakteristik korosi material, seperti potensi korosi, potensi *pitting*, dan parameter kinetik lainnya. Data yang diperoleh dari potentiostat lebih akurat dan dapat disesuaikan dalam kondisi lingkungan tertentu (Munir *et al.*, 2016).

Metode potentiostat dilakukan dengan menerapkan variasi potensial (E) pada sampel uji, kemudian diukur perubahan rapat arus (I) yang terjadi. Rapat arus korosi dapat diketahui ketika arus katodik seimbang dengan arus anodik. Potensiostat memungkinkan pengukuran laju korosi melalui perubahan potensial listrik terhadap perubahan arus yang terdeteksi selama proses korosi berlangsung dengan bantuan analisis menggunakan kurva ekstrapolasi Tafel seperti pada Gambar 2.5 dan nilai laju korosinya disajikan pada Tabel 2.4 (Andnindyara, 2016).



Gambar 2. 5. Plot Tafel Hasil Pengujian Baja *Coating* Nanopartikel Silika dalam 1% HCl dan Larutan NaCl 3.5% (Rajkumar *et al.*, 2019)

Tabel 2. 4. Hasil Pengujian Korosi pada Baja *Coating* Nanopartikel Silika dalam 1% HCl dan Larutan NaCl 3.5% (Rajkumar *et al.*, 2019)

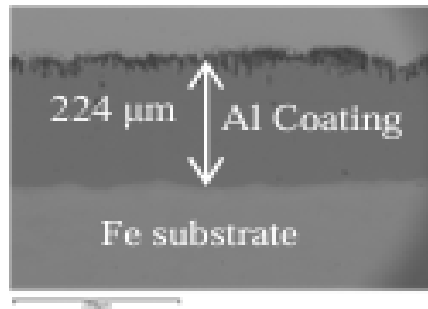
1% HCl			3,5% NaCl		
I _{corr}	IE%	Laju Korosi	I _{corr}	IE%	Laju Korosi
0,0912	44,28	0,0412	0,0235	76,82	0,0107
		<i>mpy</i>			<i>mpy</i>

J. SEM (*Scanning Electron Microscope*)

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) adalah teknik mikroskopi yang menggunakan berkas elektron untuk menghasilkan gambar permukaan sampel dengan resolusi tinggi. Dalam SEM, berkas elektron yang difokuskan diarahkan ke permukaan sampel, dan interaksi antara elektron dan atom di permukaan menghasilkan berbagai sinyal, termasuk elektron sekunder (SE) dan sinar-X, yang

dapat digunakan untuk analisis morfologi dan komposisi material. SEM sering digunakan dalam beberapa penelitian karena kemampuannya menghasilkan citra dengan resolusi tinggi sehingga memungkinkan pengamatan detail struktur permukaan sampel hingga tingkat nanometer. Dalam aplikasi coating SEM digunakan untuk mengetahui gambar dan struktur melintang pada logam yang telah di coating (Giurlani *et al.*, 2020).

Pengamatan penampang melintang pada logam yang sudah di *coating* memiliki beberapa fungsi penting, yaitu untuk menyelidiki secara detail struktur lapisan, mengidentifikasi adanya cacat, mengevaluasi kekuatan adhesi antara lapisan dan substrat serta menganalisis interaksi material yang terjadi. Informasi yang diperoleh dari pengamatan ini sangat berharga untuk memastikan bahwa lapisan coating telah diaplikasikan dengan benar, memiliki kinerja yang optimal dan dapat memenuhi persyaratan dalam berbagai aplikasi industri. Selain itu, data yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan dan optimasi proses pelapisan yang lebih baik (Giurlani *et al.*, 2020). Gambar morfologi penampang melintang logam hasil *coating* disajikan pada Gambar 2.6.

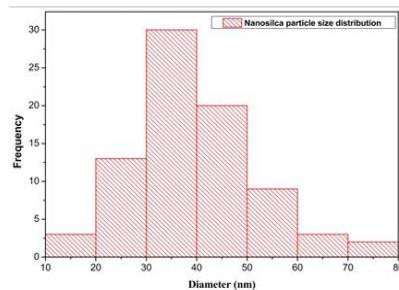


Gambar 2. 6. Struktur Penampang Melintang Logam yang di *Coating* (Saptari *et al.*, 2018)

K. PSA (*Particle Size Analyzer*)

Particle Size Analyzer adalah alat yang digunakan untuk mengukur ukuran partikel dalam suatu sampel. Alat ini berfungsi untuk menganalisis distribusi ukuran partikel yang merupakan fitur struktural penting dalam berbagai bidang, termasuk ilmu tanah, material dan teknik seperti pada Gambar 2.7. *Particle Size Analyzer* bekerja dengan prinsip interaksi cahaya laser dengan partikel. Sinar laser yang ditembakkan ke sampel akan dihamburkan oleh partikel pada sudut tertentu, tergantung pada ukuran dan bentuk partikel. Cahaya yang terhambur kemudian ditangkap oleh detektor dan diubah menjadi data digital. Data ini kemudian diproses menggunakan algoritma matematis untuk menghitung distribusi ukuran partikel dalam sampel. Metode ini menawarkan beberapa

keuntungan, seperti kecepatan analisis yang tinggi, akurasi yang baik, dan minimnya kesalahan akibat faktor manusia, sehingga sangat berguna dalam berbagai bidang seperti ilmu material, geologi, dan teknik (Peng *et al.*, 2021).



Gambar 2. 7. Histogram Ukuran Partikel Silika dari Sekam Padi (Pradeepkumar *et al.*, 2023)

L. Kajian Pustaka

Pada penelitian Othman (2017) melakukan sintesis silika dari abu sekam padi sebagai inhibitor korosi alami. Silika diekstraksi dari abu sekam padi menggunakan larutan NaOH dan air. Silika yang diekstraksi kemudian dianalisis menggunakan spektroskopi (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi nanosilikat. Ukuran partikel ditentukan dengan menggunakan mikroskop elektron transmisi (TEM) dan SEM-EDX digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan kupon baja karbon yang telah bereaksi dengan media korosif sedangkan EDX

digunakan untuk menentukan unsur-unsur yang ada pada permukaan sampel baja karbon. Silika yang diekstraksi diuji sifat anti korosinya dengan dua metode yaitu metode *weight loss* dengan perendaman selama 7 hari dalam larutan NaCl 0,5 M dan metode elektrokimia menggunakan alat potensiostat. Hasil penelitian menunjukkan nilai *Inhibition Efficiencies* (IE%) mencapai 88,4% yang menunjukkan bahwa molekul inhibitor dapat mengurangi reaksi korosi baja karbon dan nilai laju korosi adalah 0,026 *millimeters per year* (mmpy), hasil ini menunjukkan nanosilikat memiliki ketahanan korosi yang sangat baik (Othman *et al.*, 2017).

Pada penelitian Rajkumar (2018) mengkaji penggunaan silika nanopartikel (SNP) yang berasal dari sekam padi untuk menciptakan lapisan antikorosi pada baja ringan. Nanopartikel silika disintesis melalui metode ramah lingkungan dan dikarakterisasi menggunakan beberapa instrumen seperti FTIR, XRD, dan SEM-EDS. Analisis ini mengkonfirmasi pembentukan SNP dengan struktur kristal dan menunjukkan bahwa komposisinya terdiri dari silikon dan oksigen. Uji korosi dilakukan dengan menggunakan spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS) dan pengukuran polarisasi dalam larutan HCl 1% dan NaCl 3,5%. Hasil pengujian

elektrokimia menunjukkan bahwa *Inhibition Efficiencies* (IE%) adalah 45,38% dalam 1% HCl dan 77,75% dalam larutan NaCl 3,5%. Sedangkan pengukuran polarisasi menunjukkan bahwa efisiensi penghambatan SNP adalah 44,28% pada 1% HCl dan 76,82% dalam larutan NaCl 3,5%. Sehingga dapat disimpulkan pelapisan SiO₂ memberikan perlindungan yang kurang efisien pada media HCl 1% dan perlindungan yang baik dalam larutan NaCl 3,5% pada baja ringan (Rajkumar *et al.*, 2019).

Pada penelitian Gautam (2022) mensintesis pelapis antikorosi berbasis silika yang memiliki agen penyembuhan diri menggunakan *halloysite nanoclay* (HNT) yang diisi dengan inhibitor korosi benzotriazole (BTA) dan ditutup dengan nanokapsul urea-formaldehida (UFNC). Penelitian ini menyebutkan bahwa pelapis silika yang terpapar media korosif dalam kurun waktu yang lama, lapisan ini dapat retak dan permukaan baja akan terpapar media korosif. Beberapa metode dapat dilakukan untuk mengatasi kelemahan ini, yaitu melalui penambahan pigmen penghambat, bahan pengisi atau zat aditif ke dalam matriks sol-gel serta pembuatan lapisan yang dapat memperbaiki diri sendiri menggunakan agen penyembuhan otomatis yang melepaskan agen penyembuhan secara tepat waktu ketika dipicu oleh

korosi, sehingga memastikan perlindungan logam untuk jangka waktu yang lama. Tingkat ketahanan korosi untuk lapisan dengan *halloysite nanotubes* (HNT) yang diisi dengan inhibitor korosi benzotriazole (BTA) diketahui melalui pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) sehingga diketahui nilai laju korosi adalah 0,242575 mpy. Hasil ini menunjukkan bahwa pelapis antikorosi berbasis silika yang memiliki agen penyembuhan diri memiliki ketahanan korosi yang sangat tinggi (Gautam *et al.*, 2022).

Pada penelitian Liu (2022) melakukan pengembangan material pelapis antikorosi dengan menggunakan nanopartikel silika mesopori (MSN) yang digabungkan dengan graphene oxide (GO) sebagai bahan pengisi lapisan epoksi yang berfungsi untuk meningkatkan sifat penghalang dengan memberikan penghalang fisik terhadap agen korosif. Pelapisan material dilakukan menggunakan metode *spray coating*. Spektroskopi Impedansi Elektrokimia (EIS) dan pengukuran polarisasi potensiodinamik digunakan untuk mengukur ketahanan korosi pelapis dengan menganalisis impedansi substrat baja yang dilapisi dalam lingkungan korosif (larutan NaCl 3,5 wt%). Hasil impedansi elektrokimia dan kurva polarisasi menunjukkan bahwa lapisan GO/MSN dapat

meningkatkan efek perlindungan logam terhadap korosi dengan sangat baik (Liu *et al.*, 2022).

Pada penelitian Huang (2023) pengembangan lapisan berbasis nikel yang dimodifikasi dengan asam stearat pada paduan magnesium AZ31 untuk meningkatkan ketahanan korosi. Nikel memiliki beberapa kelebihan sebagai pelapis antikorosi karena ketahanannya yang tinggi terhadap media korosi, adhesi yang kuat antara lapisan nikel dan substrat serta memiliki kemampuan *antifouling*. Pengujian korosi lapisan *coating* nikel dilakukan menggunakan Impedansi Elektrokimia. Hasil pengujian menunjukkan densitas arus korosi (i_{corr}) dari lapisan nikel adalah $1,41 \times 10^{-8} \text{ A cm}^{-2}$, hasil tiga kali lebih rendah dibandingkan dengan paduan magnesium yang tidak dilapisi dan nilai laju korosi adalah 0,64534 mpy. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pelapis berbasis nikel memiliki ketahanan korosi yang tinggi (Huang *et al.*, 2023).

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, penelitian ini akan menggunakan silika gel yang disintesis dari limbah kaca dengan doping nikel sebagai bahan pengisi pelapis antikorosi. Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan limbah kaca untuk mengurangi pencemaran lingkungan dan meningkatkan masa pakai

material agar lebih tahan lama. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan silika dan nikel dapat menghambat proses terjadinya korosi. Sehingga pada penelitian ini memiliki hipotesis bahwa penambahan doping nikel pada silika gel dapat meningkatkan aktivitas antikorosi pada suatu material.

BAB 3

METODE PENELITIAN

A. Tempat Dan Waktu Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan di Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang bertempat di Laboratorium Kimia Anorganik Fakultas Sains dan Teknologi. Waktu penelitian akan dilaksanakan pada periode aktif perkuliahan.

B. Alat Dan Bahan

1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua kelompok yaitu alat preparasi dan alat analisis. Alat preparasi meliputi seperangkat alat gelas, mortar, *ball milling*, cawan porselen, refluks, termometer, kertas saring, *magnetic stirrer*, pH *universal*, neraca analitik (Mettler AE 60), oven (Mettmert UN 30), *furnace* (Thermolyne) dan *spray gun* (K110). Adapun alat analisis terdiri dari *Fourier Transform InfraRed* (FTIR, BRUKER, ALPHA II), *Laser Particle Size Analyzer* (LPSA, Labtron, LLPA-C10), *Scanning Electron Microscope* (SEM, Phenom Pro X) dan Potensiostat (Gamry Instruments, Reference 3000).

2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain HCl (Merck, p.a), NaOH (Merck, p.a), Akuades, limbah kaca yang berwarna bening, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck, p.a) dan NaCl (Merck, p.a).

C. Prosedur Penelitian

1. Sintesis dan karakterisasi Ni-SiO₂

a) Persiapan Bahan Baku

Limbah kaca yang telah dikumpulkan dibersihkan untuk menghilangkan semua kotoran, debu, atau partikel yang menempel di permukaannya kemudian dikeringkan. Setelah dipastikan benar-benar kering, limbah kaca kemudian dihaluskan menggunakan metode *ball milling*, yaitu teknik penggilingan dengan bola-bola baja yang bertujuan untuk mengubah ukuran partikel kaca menjadi serbuk halus. Limbah kaca yang telah dibersihkan ditimbang sebanyak 50 gram kemudian dimasukkan ke dalam tabung yang berisi bola baja. Proses penggilingan dilakukan sebanyak tiga kali dengan durasi masing-masing 15 menit dan kecepatan putaran pada level optimal. Metode ini memastikan bahwa material

yang dihasilkan memiliki ukuran yang seragam dan siap untuk diproses lebih lanjut dalam tahapan sintesis berikutnya.

b) Ekstraksi Silika dari Limbah Kaca

Sebanyak 25 gram serbuk kaca dilarutkan dengan 100 mL NaOH 2M dan direaksikan menggunakan refluks selama 1 jam pada suhu 80°C. Kemudian larutan didiamkan sampai suhu ruang, disaring dan diambil filtratnya berupa larutan natrium silikat yang dapat digunakan sebagai prekursor silika. Larutan natrium silikat ditambahkan HCl 1M sampai terbentuk gel dan pH mendekati 7. Selanjutnya Gel didiamkan (*aging*) selama 18 jam. Gel yang telah kaku dicuci dengan aquades untuk menghilangkan pengotor berupa garam NaCl. Lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 8 jam. Silika yang telah kering dihaluskan, kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR untuk mengetahui keberadaan gugus fungsi silika dan PSA untuk mengetahui ukuran partikel.

c) Penambahan Doping Nikel

$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditimbang sebanyak 5%, 10% dan 15% berdasarkan massa silika seperti pada persamaan 3.1. Sebanyak 10 gram serbuk silika hasil sintesis dilarutkan dengan 50 mL larutan NaOH 4M menggunakan *magnetic stirrer* dengan suhu 80°C lalu ditambahkan $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang telah ditimbang sebelumnya. Selanjutnya larutan campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam pada suhu 80°C . Sampel yang diperoleh disaring kemudian ditambahkan HCl 2M hingga pH netral dan terbentuk endapan, kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan kimia yang ada dalam material.

$$\% \text{ Ni} \times \text{Massa Silika} = A \quad (3.1)$$

$$\frac{A}{x} = \frac{\text{Ar Ni}}{\text{Mr NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}$$

$$x = \text{Massa Ni}$$

2. Pelapisan Pada Logam Besi

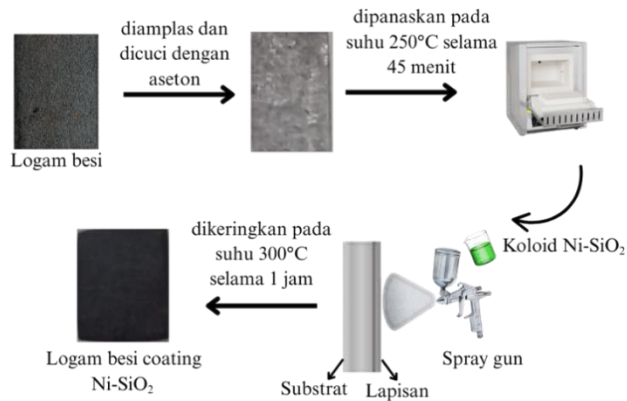
a) Pelapisan Si

Logam besi dengan ukuran panjang 2 cm, lebar 3 cm dan ketebalan 2 mm diampelas terlebih dahulu kemudian dicuci menggunakan aseton untuk menghilangkan pengotor. Selanjutnya logam dipanaskan pada suhu 250°C selama 45 menit. Setelah itu, logam besi dilapisi dengan 25 mL gel silika hasil sintesis menggunakan *spray gun* secara menyeluruh kemudian dikeringkan pada suhu 300°C selama 1 jam. Setelah proses pelapisan dan pengeringan pada satu sisi selesai, logam dibalik dan dilakukan pelapisan pada sisi lainnya menggunakan prosedur yang sama, yaitu penyemprotan 25 mL gel silika hasil sintesis secara merata menggunakan *spray gun*, kemudian dikeringkan kembali pada suhu 300°C selama 1 jam untuk memastikan pembentukan lapisan pada kedua sisi permukaan logam.

b) Pelapisan Ni-SiO₂

Logam besi dengan ukuran panjang 2 cm, lebar 3 cm dan ketebalan 2 mm diampelas terlebih dahulu kemudian dicuci menggunakan aseton untuk menghilangkan pengotor. Selanjutnya logam

dipanaskan pada suhu 250°C selama 45 menit. Setelah itu, logam besi dilapisi dengan 25 mL koloid Ni-SiO₂ hasil sintesis menggunakan *spray gun* secara menyeluruh kemudian dikeringkan pada suhu 300°C selama 1 jam. Setelah proses pelapisan dan pengeringan pada satu sisi selesai, logam dibalik dan dilakukan pelapisan pada sisi lainnya menggunakan prosedur yang sama, yaitu penyemprotan 25 mL koloid Ni-SiO₂ hasil sintesis secara merata menggunakan *spray gun*, kemudian dikeringkan kembali pada suhu 300°C selama 1 jam untuk memastikan pembentukan lapisan pada kedua sisi permukaan logam. Karakterisasi dilakukan menggunakan SEM *Cross Section* untuk mengetahui morfologi lapisan *coating* pada logam. Ilustrasi proses pelapisan logam dengan koloid Ni-SiO₂ disajikan pada Gambar 3.1.

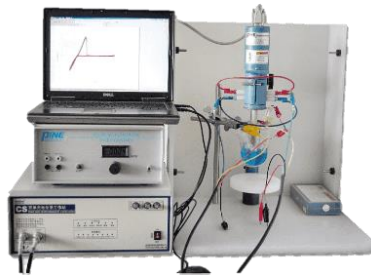


Gambar 3. 1. Proses Pelapisan Ni-SiO_2 pada Logam Besi

3. Pengujian Aktivitas Korosi

Logam yang telah dilapisi dengan gel silika dan koloid Ni-SiO_2 kemudian diuji menggunakan perangkat Potensiostat untuk mengetahui nilai laju korosi yang terjadi pada logam tersebut. Prinsip kerja Potensiostat adalah berdasarkan konfigurasi tiga elektroda, yaitu elektroda kerja (logam yang diuji), elektroda referensi, dan elektroda pembanding seperti pada Gambar 3.2. Tegangan yang dikontrol pada elektroda kerja terhadap elektroda referensi menyebabkan timbulnya arus akibat reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan logam dengan larutan elektrolit. Besarnya arus ini digunakan sebagai indikator untuk

menentukan laju korosi logam. Uji ini dilakukan untuk menganalisis sejauh mana lapisan *coating* mampu melindungi logam dari proses korosi.



Gambar 3. 2. Rangkaian Alat Potensiostat

4. Analisis Data

a) FTIR

Data yang diperoleh dari pengujian FTIR berupa spektrum serapan inframerah, yang menggambarkan hubungan antara bilangan gelombang dengan intensitas serapan. Data FTIR dianalisis secara kualitatif dengan mengidentifikasi puncak-puncak serapan utama pada spektrum inframerah. Nilai bilangan gelombang (cm^{-1}) yang muncul dibandingkan dengan data referensi literatur untuk menentukan keberadaan gugus fungsi tertentu.

b) PSA

Data yang diperoleh dari pengujian PSA berupa nilai rata-rata ukuran partikel dan nilai persentil ukuran partikel. Persentil ukuran partikel digunakan untuk menghitung nilai span menggunakan Persamaan 3.1. Nilai span yang berfungsi untuk mengetahui tingkat keseragaman ukuran partikel.

$$Span = \frac{D90 - D10}{D50} \quad (3.1)$$

D10 : Diameter partikel di mana 10% dari partikel memiliki ukuran lebih kecil dari nilai ini

D50 : Diameter partikel di mana 50% dari partikel memiliki ukuran lebih kecil dari nilai ini (*median*)

D90 : Diameter partikel di mana 90% dari partikel memiliki ukuran lebih kecil dari nilai ini

c) SEM Cross Section

Data yang diperoleh pada pengujian SEM Cross Section berupa morfologi penampang melintang logam yang telah dilapisi. Gambar-gambar yang diperoleh digunakan untuk mengamati distribusi lapisan, ketebalan lapisan dan keberadaan celah

atau pori pada antarmuka antara substrat logam dan material coating. Analisis ketebalan lapisan dilakukan menggunakan software ImageJ. Langkah-langkah analisisnya meliputi kalibrasi skala sehingga pengukuran yang dilakukan dalam piksel dapat dikonversi ke satuan mikrometer (μm), penentuan area pengukuran dan pengukuran ketebalan.

d) Potensiostat

Data yang diperoleh dari pengujian potensiostat berupa kurva tafel yang menggambarkan hubungan antara potensial korosi dengan arus korosi serta nilai laju korosi. Nilai laju korosi digunakan untuk mengetahui persentase efisiensi inhibisi melalui Persamaan 3.2.

$$\%IE = \frac{W_o - W_i}{W_o} \times 100 \quad (3.2)$$

$\%IE$: Persen efisiensi inhibitor

W_o : Laju korosi tanpa inhibitor

W_i : Laju korosi dengan inhibitor

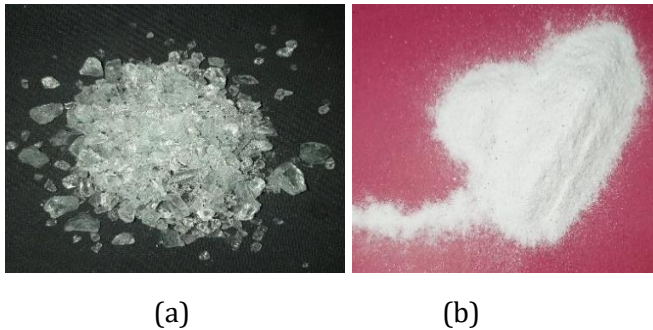
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sintesis Ni-SiO₂

1. Ekstraksi Silika dari Limbah Kaca

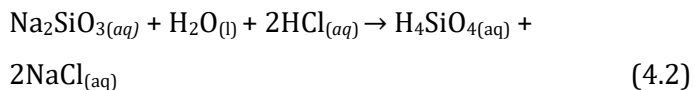
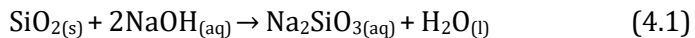
Limbah kaca memiliki kandungan utama SiO₂ pada komposisi senyawanya (Suharto *et al.*, 2021). Kandungan SiO₂ yang tinggi ini dapat dimanfaatkan dan diolah menjadi silika gel. Limbah kaca yang digunakan sebagai bahan baku berupa sisa potongan kaca jendela yang diperoleh dari toko kaca. Sebelum dilakukan sintesis limbah kaca dihaluskan terlebih dahulu menggunakan *ball milling* untuk mengubah ukuran limbah kaca menjadi serbuk.



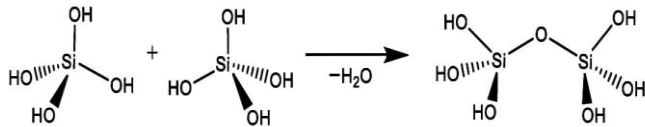
Gambar 4. 1. (a). Limbah Sisa Potongan Kaca dan (b). Limbah Kaca Serbuk

Ball milling adalah mesin penggilingan yang digunakan untuk menghaluskan material menjadi partikel-partikel yang sangat kecil, bahkan hingga ukuran serbuk atau nano. Untuk menghaluskan kaca menggunakan *ball milling*, setting alat perlu dilakukan agar proses penggilingan efisien dan menghasilkan ukuran partikel yang diinginkan (Ramadhan, 2019). *Setting* alat ini meliputi kecepatan putaran dan durasi penggilingan. Kecepatan putaran yang digunakan adalah kecepatan dengan level optimal dan dengan durasi waktu selama 15 menit. Penggilingan dilakukan sebanyak tiga kali, di mana setiap pengulangan dilakukan proses sortir untuk memisahkan partikel kaca berdasarkan ukurannya sehingga pada penggilingan ketiga diperoleh serbuk kaca seperti pada Gambar 4.1. Silika merupakan komponen utama kaca yang memiliki kelarutan rendah. Namun ketika diubah menjadi serbuk, partikel-partikel silika menjadi lebih kecil. Partikel yang lebih kecil umumnya memiliki kelarutan yang lebih tinggi dibandingkan partikel yang lebih besar, sehingga memudahkan silika untuk larut dalam pelarut.

Ekstraksi silika dari limbah kaca menggunakan metode sol-gel melalui reaksi hidrolisis dan kondensasi. Serbuk kaca dilarutkan dalam larutan NaOH panas menghasilkan larutan natrium silikat sebagai prekursor silika seperti pada Persamaan 4.1. Natrium silikat berfungsi sebagai sumber silika yang akan mengalami reaksi hidrolisis dan kondensasi lebih lanjut.



Ketika HCl ditambahkan, ion H^+ yang berasal dari HCl akan bereaksi dengan anion silikat sehingga menghasilkan senyawa asam silikat terlarut seperti pada Persamaan 4.2. Senyawa asam silikat kemudian mengalami reaksi hidrolisis dan membentuk gugus silanol (Si-OH). Senyawa ini kemudian mengalami reaksi kondensasi dimana gugus Si-OH bereaksi satu sama lain membentuk ikatan Si-O-Si dan menghasilkan struktur silika gel seperti pada Gambar 4.2 (A'yuni *et al.*, 2023).

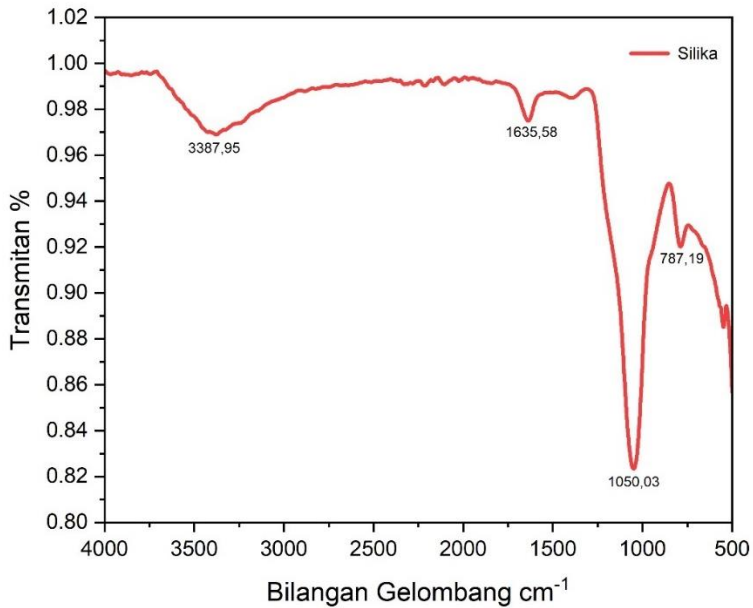


Gambar 4. 2. Reaksi Kondensasi (A'yuni *et al.*, 2023)

Silika gel yang terbentuk dilakukan *aging* selama 18 jam agar struktur silika gel menjadi lebih kuat dan pori-porinya lebih seragam. Silika gel dipanaskan menggunakan oven pada suhu 100°C untuk menguapkan sisa pelarut dari gel silika. Silika gel yang telah kering dihaluskan seperti pada Gambar 4.3 kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR. Spektrum silika gel disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 3. Silika dari Limbah Kaca



Gambar 4. 4. Spektrum FTIR Silika Gel

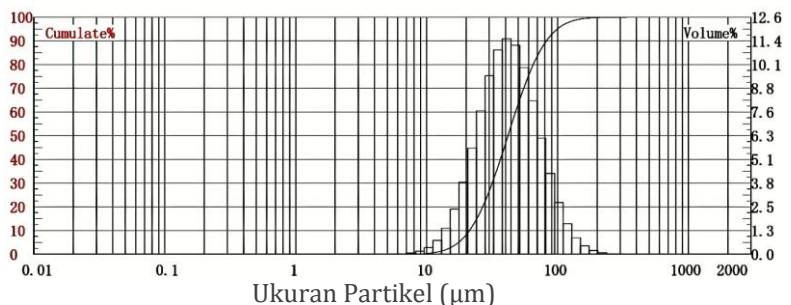
Pita serapan silika gel hasil sintesis dibandingkan dengan pita serapan kiesel gel 60 pada penelitian Anisara (2024). Kiesel gel 60 digunakan sebagai pembanding untuk memastikan keberadaan gugus silanol dan siloksan yang muncul pada silika gel hasil sintesis. Berdasarkan Gambar 4.4 pada pita serapan $787,19 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran simetri ikatan Si-O-Si. Pita serapan $1050,03 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran asimetri ikatan Si-O-Si yang menandakan keberadaan gugus siloksan. Pita serapan $1635,58 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran ikatan H-O-H (air teradsorpsi)

dan pita serapan 3387,95 cm⁻¹ menunjukkan getaran regangan gugus silanol (Si-O-H) yang melebar karena adanya ikatan hidrogen. Interpretasi serapan FTIR silika gel hasil sintesis dan kiesel gel 60 disajikan pada Tabel 4.1. Data spektrum FTIR menyatakan bahwa ekstraksi silika dari limbah kaca telah berhasil dilakukan, hal ini ditunjukkan oleh keberadaan gugus siloksan dan gugus silanol.

Tabel 4. 1. Interpretasi Serapan FTIR Silika Gel Hasil Sintesis dan Kiesel Gel 60

Rentang Frekuensi (cm ⁻¹)	Bilangan Gelombang		Interpretasi Gugus Fungsi
	Silika Gel Sintesis	Kiesel Gel 60 (Anisara <i>et al.</i> , 2024)	
3700- 3200	3387,95	3327,96	Getaran regangan Si-O-H
1650- 1630	1635,58	1631,09	Getaran ikatan H- O-H
1200- 1020	1050,03	1059,29	Getaran asimetri ikatan Si-O-Si
800-730	787,19	796,46	Getaran simetri ikatan Si-O-Si

Distribusi ukuran partikel silika hasil sintesis juga telah diamati menggunakan instrumen *Particle Size Analyzer* seperti pada Gambar 4.5. Berdasarkan pengujian diameter ukuran partikel silika rata-rata sebesar 48,013 mikrometer, hal ini ditunjukkan oleh puncak tertinggi histogram terletak pada ukuran 48,013 mikrometer, yang menandakan bahwa partikel dengan ukuran nilai ini merupakan fraksi volume terbanyak dalam sampel. Garis miring pada histogram merupakan kurva kumulatif yang menggambarkan persentase akumulatif partikel yang memiliki ukuran lebih kecil dari nilai tertentu pada sumbu horizontal.



Gambar 4. 5. Distribusi Ukuran Partikel Silika

Pada pengujian ini kurva kumulatif menunjukkan nilai diameter partikel pada persentil tertentu seperti pada Tabel 4.2. Nilai tersebut dapat digunakan untuk menentukan keseragaman ukuran

partikel melalui nilai span. Berdasarkan perhitungan nilai span yang diperoleh adalah 1,459. Nilai span yang rendah atau mendekati 0 menunjukkan bahwa sampel memiliki distribusi ukuran partikel yang lebih seragam, sedangkan nilai span yang tinggi menunjukkan bahwa sampel memiliki distribusi ukuran partikel yang kurang seragam (Mujiyanti *et al.*, 2020).

Tabel 4. 2. Persentase Distribusi Diameter Ukuran Partikel

Persentase	Nilai
D10	21,208 μm
D50	41,738 μm
D90	82,124 μm

Ukuran partikel rata-rata sebesar 48,013 μm menunjukkan bahwa silika hasil sintesis tergolong dalam kategori material berukuran mikro. Mikrosilika memiliki luas permukaan yang besar sehingga dapat meningkatkan jumlah gugus aktif di permukaan silika seperti gugus silanol (Arga, 2018). Gugus-gugus hidroksil ini sangat reaktif dan dapat berinteraksi secara kimia. Luas permukaan yang besar berarti ada lebih banyak situs bagi interaksi ini untuk terjadi. Hal ini dapat memperbaiki daya rekat (*adhesi*) coating

pada substrat dan meningkatkan kestabilan lapisan pelindung (Arga, 2018). Berdasarkan hasil karakterisasi dapat disimpulkan bahwa ekstraksi silika dari limbah kaca telah berhasil dilakukan.

2. Penambahan Doping Ni

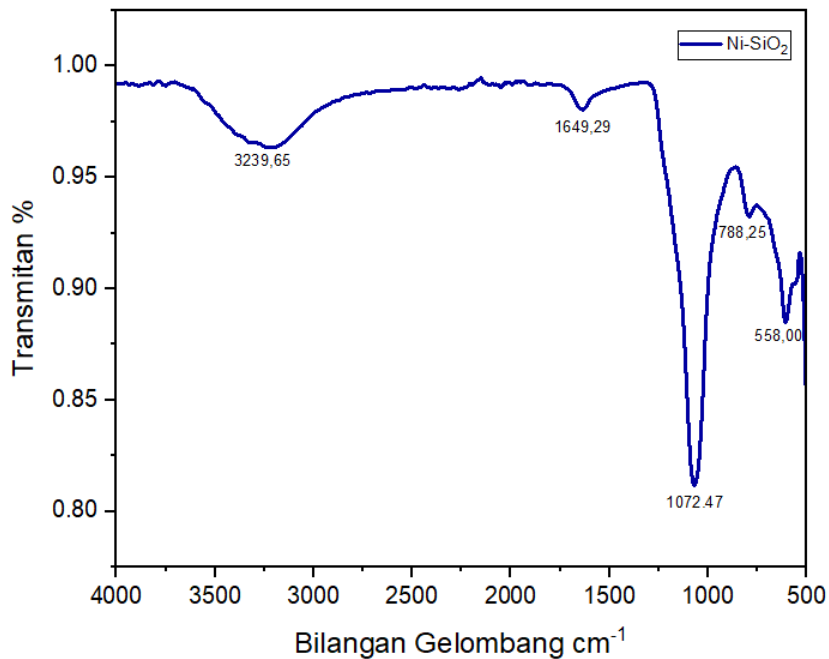
Penambahan doping Ni dilakukan dengan menggunakan metode sol-gel. Metode sol-gel dipilih sebagai teknik penambahan doping karena memungkinkan pencampuran dopan secara homogen (Bokov *et al.*, 2021). Pada tahap ini, serbuk silika hasil sintesis dilarutkan dalam larutan NaOH menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu 80°C. Tahap ini bertujuan untuk mengubah silika padat (SiO_2) menjadi larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dan pemanasan hingga 80°C bertujuan untuk meningkatkan kelarutan silika dalam larutan NaOH. Pada kondisi ini, NiSO_4 ditambahkan secara bertahap agar ion Ni^{2+} dapat terdoping secara merata ke dalam larutan silikat. NiSO_4 ditambahkan dalam tiga variasi konsentrasi yaitu 5%, 10%, dan 15% berdasarkan massa silika. Variasi ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh kadar nikel terhadap sifat antikorosi material. Larutan campuran diaduk selama 1 jam pada suhu 80°C. Pengadukan ini bertujuan untuk memastikan homogenitas campuran dan

memaksimalkan interaksi antara ion Ni^{2+} dan senyawa silikat dalam larutan.

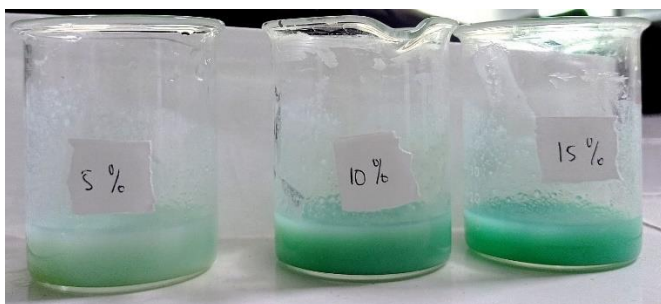
Setelah proses pencampuran selesai, larutan campuran kemudian disaring dengan tujuan untuk menghilangkan partikel-partikel yang tidak larut. Setelah penyaringan, larutan ditambahkan HCl secara bertahap hingga mencapai pH netral dan terbentuk endapan. Penambahan HCl bertujuan untuk menetralkan kelebihan NaOH dalam larutan dan menurunkan pH larutan natrium silikat. Penurunan pH akan menyebabkan senyawa silikat menjadi tidak stabil dalam larutan dan mengalami kondensasi, membentuk kembali padatan silika dalam bentuk silika gel. Pada saat yang bersamaan, ion Ni^{2+} akan berinteraksi dengan senyawa silikat yang mengendap, membentuk fase nikel silikat atau komposit nikel-silika (Wardiyati *et al.*, 2018). Koloid Ni-SiO₂ yang terbentuk berwarna hijau seperti pada Gambar 4.7.

Material yang disintesis kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR. Hasil pengujian FTIR disajikan pada Gambar 4.6. Berdasarkan data spektrum FTIR pada pita serapan 558,00 cm^{-1} menunjukkan getaran Ni-O yang menandakan adanya pembentukan senyawa atau ikatan Ni-O-Si seperti

yang dilaporkan pada penelitian Budiarto (2022) bahwa pita serapan Ni-O berada pada rentang panjang gelombang 516-599 cm^{-1} sedangkan pada penelitian Reddy (2015) vibrasi Ni-O-Si muncul pada panjang gelombang 556 cm^{-1} . Pita serapan 788,25 cm^{-1} menunjukkan getaran simetri ikatan Si-O-Si. Pita serapan 1072,47 cm^{-1} menunjukkan getaran asimetri ikatan Si-O-Si yang menandakan keberadaan gugus siloksan. Pita serapan 1649,29 cm^{-1} menunjukkan getaran ikatan H-O-H (air teradsorpsi) dan pita serapan 3239,65 cm^{-1} menunjukkan getaran regangan gugus silanol (Si-O-H) yang melebar karena adanya ikatan hidrogen. Berdasarkan hasil karakterisasi dapat disimpulkan bahwa sintesis Ni-SiO₂ menggunakan metode sol-gel telah berhasil dilakukan.



Gambar 4. 6. Spektrum FTIR Ni-SiO₂ 15%



Gambar 4. 7. Ni-SiO₂ 5%, Ni-SiO₂ 10% dan Ni-SiO₂ 15%

B. Pelapisan pada Logam Besi

1. Pelapisan Si

Proses pelapisan logam besi menggunakan gel silika hasil sintesis dilakukan dengan metode *spray coating* merupakan teknik pelapisan permukaan yang memanfaatkan penyemprotan partikel halus secara merata untuk membentuk lapisan pelindung. Pada penelitian ini, 25 mL gel silika hasil sintesis dimasukkan ke dalam *spray gun* sebagai bahan pelapis. Sebelum proses pelapisan dilakukan, permukaan logam besi dengan ukuran panjang 2 cm, lebar 3 cm dan ketebalan 2 mm diampelas terlebih dahulu dengan tujuan menghilangkan pengotor seperti debu, karat, atau oksida serta menciptakan kekasaran mikro yang dapat meningkatkan daya lekat (*adhesi*) lapisan pelapis. Setelah itu, logam dicuci menggunakan aseton untuk menghilangkan pengotor organik. Logam besi yang telah diampelas dan dicuci dengan aseton berwarna putih keperakan seperti pada Gambar 4.8. Selanjutnya logam dipanaskan hingga suhu 250 °C selama 45 menit untuk menguapkan kelembapan yang tersisa dan membuka pori-pori permukaan sehingga mempermudah partikel silika menempel secara lebih efektif (Fernandez *et al.*, 2021).



Gambar 4. 8. Logam Besi Sebelum Dilapisi Gel Silika

Proses pelapisan dilakukan dengan menyemprotkan gel silika menggunakan *spray gun* ke seluruh permukaan logam secara merata. Penyemprotan dilakukan secara berulang dan searah untuk memastikan semua permukaan logam telah terlapisi. Setelah proses pelapisan selesai, logam yang telah terlapisi kemudian dikeringkan pada suhu 300°C selama 1 jam. Tahap pemanasan lanjutan ini berfungsi untuk menguapkan sisa pelarut dan membantu gel silika membentuk struktur padat yang terikat kuat pada permukaan logam. Selain itu, pemanasan juga dapat menyebabkan ikatan antarpartikel menjadi lebih stabil, memperkuat struktur lapisan, serta meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan keausan (Irawan, 2016). Setelah satu sisi selesai dilapisi dan dikeringkan, logam dibalik dan dilakukan pelapisan ulang pada sisi lainnya menggunakan prosedur yang sama. Hal ini bertujuan untuk

memastikan perlindungan korosi secara menyeluruh terhadap kedua sisi permukaan logam. Logam besi yang telah dilapisi dengan gel silika berwarna hitam seperti pada Gambar 4. 9.



Gambar 4. 9. Logam Besi Setelah Dilapisi Gel Silika

2. Pelapisan Ni-SiO₂

Proses pelapisan logam besi dilakukan menggunakan 25 mL koloid Ni-SiO₂ dengan metode *spray coating* merupakan teknik pelapisan permukaan yang memanfaatkan penyemprotan partikel halus secara merata untuk membentuk lapisan pelindung. Dalam metode ini, koloid Ni-SiO₂ yang telah disintesis terlebih dahulu dimasukkan ke dalam *spray gun* sebagai bahan pelapis. Koloid tersebut terdiri dari partikel nikel dan silika yang terdispersi halus dalam medium cair, sehingga memiliki kestabilan yang baik untuk disemprotkan. Sebelum proses pelapisan dilakukan, permukaan logam besi dengan ukuran panjang 2 cm, lebar 3 cm dan ketebalan 2 mm diampelas

terlebih dahulu dengan tujuan menghilangkan pengotor seperti debu, karat, atau oksida serta menciptakan kekasaran mikro yang dapat meningkatkan daya lekat (*adhesi*) lapisan pelapis. Setelah itu, logam dicuci menggunakan aseton untuk menghilangkan pengotor organik. Logam besi yang telah diamplas dan dicuci dengan aseton berwarna putih keperakan seperti pada Gambar 4.8. Selanjutnya logam dipanaskan hingga suhu 250°C selama 45 menit untuk menguapkan kelembapan yang tersisa dan membuka pori-pori permukaan sehingga mempermudah partikel koloid menempel secara lebih efektif (Fernandez *et al.*, 2021).

Proses pelapisan dilakukan dengan menyemprotkan koloid Ni-SiO₂ menggunakan *spray gun* ke seluruh permukaan logam secara merata. Penyemprotan dilakukan secara berulang dan searah untuk memastikan semua permukaan logam telah terlapsi. Setelah proses pelapisan selesai, logam yang telah terlapsi kemudian dikeringkan pada suhu 300°C. Tahap pemanasan lanjutan ini berfungsi untuk menguapkan sisa pelarut dan membantu partikel Ni-SiO₂ membentuk struktur padat yang terikat kuat pada permukaan logam. Selain itu, pemanasan juga dapat

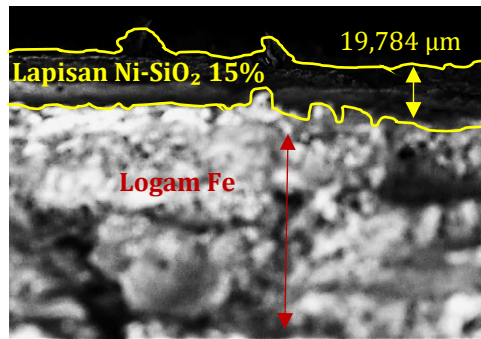
menyebabkan ikatan antarpartikel menjadi lebih stabil, memperkuat struktur lapisan, serta meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan keausan (Irawan, 2016). Setelah pelapisan pada satu sisi selesai dilakukan, logam kemudian dibalik untuk melapisi sisi lainnya dengan prosedur yang sama. Perlakuan pada kedua sisi ini bertujuan untuk memberikan perlindungan yang merata terhadap seluruh permukaan logam dari paparan lingkungan yang bersifat korosif. Logam besi yang telah dilapisi dengan koloid Ni-SiO_2 berwarna hitam seperti pada Gambar 4. 10.



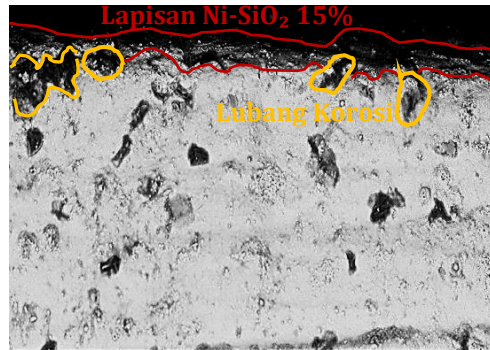
Gambar 4. 10. Logam Besi Setelah Dilapisi Ni-SiO_2

Logam besi yang telah dilapisi kemudian diuji menggunakan SEM *Cross Section* untuk mengetahui morfologi penampang melintang lapisan *coating*. Berdasarkan pengujian SEM *Cross Section* menunjukkan hasil *coating* masih belum merata dan beberapa bagian terdapat penumpukan hasil *coating*

seperti pada gambar 4.11. Hal ini disebabkan karena pada saat proses pengulangan pelapisan, partikel tidak menyebar secara merata ke seluruh permukaan. Akibat hasil pelapisan yang tidak merata, logam yang telah dilakukan pengujian korosi mengalami pengelupasan pada beberapa bagian sehingga menyebabkan terbentuknya lubang korosi seperti pada gambar 4.12. Adapun ketebalan hasil *coating* diamati menggunakan software ImageJ. Berdasarkan hasil analisis ketebalan *coating* Ni-SiO₂ 15% pada logam besi adalah 19,784 μm .



Gambar 4. 11. Logam Besi *Coating* Ni-SiO₂ 15%



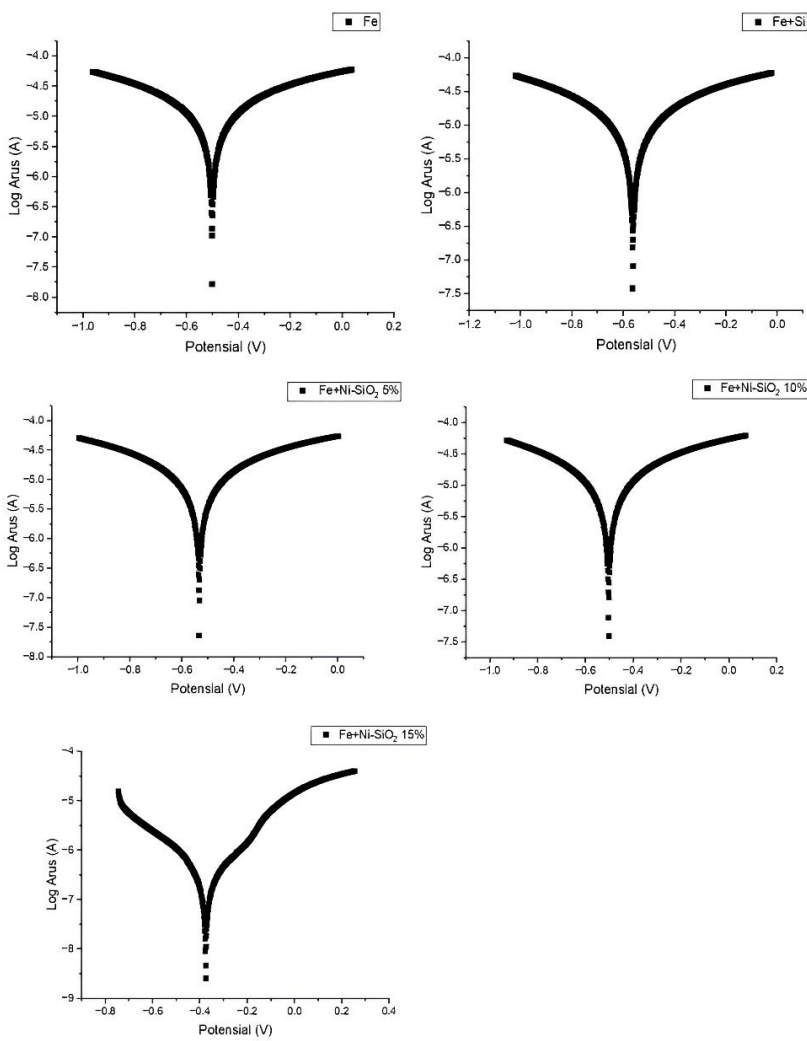
Gambar 4. 12. Logam Besi *Coating* Ni-SiO₂ 15% Setelah Proses Korosi

C. Sifat Antikorosi Pelapis

Korosi merupakan proses degradasi material logam akibat reaksi elektrokimia antara logam dan lingkungan sekitarnya, terutama yang mengandung air dan ion-ion agresif seperti Cl^- (Gapsari, 2017). Besi sebagai salah satu logam yang paling banyak digunakan dalam berbagai industri sangat rentan terhadap korosi terutama di lingkungan terbuka atau lembap, untuk mengatasi permasalahan ini, salah satu metode yang umum digunakan adalah pelapisan permukaan logam dengan material pelindung yang bersifat *inert* atau mampu membentuk lapisan pasif. Dalam penelitian ini, dilakukan pelapisan logam besi dengan silika dan material komposit Ni-SiO₂ dengan variasi konsentrasi 5%, 10%, dan 15%.

Evaluasi ketahanan korosi dilakukan menggunakan metode potensiostat, yaitu teknik elektrokimia yang mampu mengukur arus dan potensial pada elektroda untuk mengetahui laju korosi secara presisi dalam satuan *mm/year*. Data hasil pengujian korosi menggunakan metode potensiostat berupa kurva tafel dan nilai laju korosi seperti pada Gambar 4.13 dan Tabel 4.3. Kurva Tafel adalah grafik yang memplotkan potensial elektroda pada sumbu vertikal terhadap kerapatan arus pada sumbu horizontal (Yuristia, 2019). Dalam kurva tafel terdapat perpotongan garis bagian anodik dan bagian katodik. Bagian anodik merupakan area pada kurva yang terletak di sisi kanan dari potensial korosi dan mewakili reaksi oksidasi di mana logam melepaskan elektron dan berubah menjadi ion terlarut. Pada proses ini logam secara bertahap larut ke dalam larutan elektrolit. Adapun bagian katodik berada di sisi kiri dari potensial korosi dan menggambarkan reaksi reduksi yang terjadi di lingkungan sekitar logam. Perpotongan antara garis anodik dan katodik pada kurva Tafel menunjukkan titik potensial korosi dari suatu material. Potensial korosi merupakan tegangan elektrokimia di mana laju reaksi oksidasi logam sama dengan laju reaksi reduksi dari lingkungan. Nilai ini menunjukkan kecenderungan logam untuk terkorosi.

Semakin positif nilainya, maka semakin baik ketahanan korosinya.



Gambar 4. 13. Kurva Tafel Pengujian Korosi

Tabel 4. 3. Nilai Laju Korosi

Sampel	Laju Korosi	Keterangan
Besi	0,47565 <i>mm/year</i>	<i>Good</i>
Besi <i>coating</i> Si	0,19475 <i>mm/year</i>	<i>Excellent</i>
Besi <i>coating</i> NiSiO ₂ 5%	0,15776 <i>mm/year</i>	<i>Excellent</i>
Besi <i>coating</i> NiSiO ₂ 10%	0,12157 <i>mm/year</i>	<i>Excellent</i>
Besi <i>coating</i> NiSiO ₂ 15%	0,01036 <i>mm/year</i>	<i>Outstanding</i>

Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju korosi logam besi tanpa pelapisan adalah sebesar 0,47565 *mm/year* yang menandakan bahwa besi dalam keadaan terbuka sangat mudah mengalami oksidasi dan pembentukan karat dalam lingkungan pengujian. Setelah dilapisi dengan silika, laju korosi menurun secara signifikan menjadi 0,19475 *mm/year* yang berarti pelapisan silika mampu menghambat difusi oksigen dan ion-ion korosif ke permukaan logam dengan membentuk lapisan penghalang fisik yang *inert* (Figueira, 2020). Namun, efektivitas perlindungan silika masih terbatas karena dapat mengalami degradasi berupa retakan atau kerusakan setelah pemaparan jangka panjang terhadap media korosif (Gautam *et al.*, 2022). Oleh karena itu,

diperlukan bahan pengisi ke dalam matriks pelapis untuk mengatasi kelemahan tersebut (Liu et al., 2022). Oleh karena itu, digunakanlah pelapis komposit berbasis Ni-SiO₂ yang memadukan sifat pasifasi dari nikel (Ni) dan sifat penghalang fisik dari silika (SiO₂).

Pelapisan dengan Ni-SiO₂ 5% menurunkan laju korosi lebih lanjut menjadi 0,15776 *mm/year* yang menunjukkan bahwa keberadaan nikel sudah mulai berkontribusi terhadap perlindungan antikorosi. Nikel diketahui mampu membentuk lapisan pasif tipis berupa oksida nikel yang melindungi permukaan logam dari serangan ion-ion korosif. Penambahan konsentrasi Ni-SiO₂ hingga 10% menghasilkan laju korosi sebesar 0,12157 *mm/year* yang menandakan bahwa ketahanan korosi semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kandungan nikel dalam pelapis. Efektivitas tertinggi diperoleh pada pelapisan dengan Ni-SiO₂ 15% yang menunjukkan laju korosi yang sangat rendah yaitu 0,01036 *mm/year*.

Penurunan drastis laju korosi dari 0,47565 mm/year menjadi 0,01036 mm/year pada pelapisan Ni-SiO₂ 15% menunjukkan tingkat efisiensi inhibisi korosi yang sangat tinggi yaitu sekitar 97,82%. Tabel efisiensi inhibisi disajikan pada Tabel 4.4. Tingginya efisiensi ini menunjukkan bahwa lapisan pelindung yang terbentuk sangat rapat sehingga mampu menghambat masuknya oksigen, air dan ion Cl⁻ yang merupakan penyebab utama reaksi korosi pada besi. Selain itu, sifat *adhesi* dan kekerasan lapisan yang dihasilkan juga meningkat pada persentase Ni-SiO₂ yang lebih tinggi sehingga tidak mudah terkelupas pada media korosif. Interaksi antara partikel silika dan nikel dalam matriks pelapis memungkinkan terbentuknya lapisan pelindung yang sangat efektif baik secara fisik maupun elektrokimia. Berdasarkan hasil uji korosi material Ni-SiO₂ berpotensi sebagai pelapis antikorosi.

Tabel 4. 4. Efisiensi Inhibisi

Sampel	Efisiensi Inhibisi
Si	59,05%
Ni-SiO ₂ 5%	66,83%
Ni-SiO ₂ 10%	74,44%
Ni-SiO ₂ 15%	97,82%

BAB 5

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini maka dapat disimpulkan:

1. Berdasarkan analisis data pita serapan FTIR yang diperoleh, keberhasilan sintesis Ni-SiO₂ dapat dikonfirmasi melalui identifikasi gugus fungsi siloksan pada panjang gelombang 1050,03 cm⁻¹ dan gugus silanol pada panjang gelombang 3387,95 cm⁻¹ serta adanya ikatan Ni pada senyawa silikat pada panjang gelombang 558,00 cm⁻¹. Adapun diameter ukuran partikel silika rata-rata adalah 48,013 μm.
2. Hasil pelapisan logam besi menggunakan koloid Ni-SiO₂ hasil sintesis dengan metode *spray coating* menunjukkan bahwa lapisan pelindung logam berhasil terbentuk. Namun, analisis SEM *Cross Section* menunjukkan adanya lapisan yang belum merata karena terdapat penumpukan material *coating*. Lapisan pelindung yang tidak merata berpotensi menyebabkan korosi akibat pengelupasan dalam media korosif.

3. Pelapisan logam besi dengan material Ni-SiO_2 memberikan peningkatan signifikan terhadap ketahanan korosi, terutama pada konsentrasi 15% dengan nilai laju korosi $0,01036 \text{ mm/year}$ dan inhibisi korosi sebesar 97,82%. Mekanisme perlindungan yang terjadi melibatkan kombinasi perlindungan pasif oleh lapisan oksida nikel dan hambatan difusi oleh partikel silika.

B. Saran

Merujuk pada hasil penelitian dan kesimpulan, beberapa saran berikut dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya:

1. Agar lapisan *coating* pada logam lebih merata, penelitian selanjutnya disarankan mensintesis silika dengan ukuran partikel yang lebih kecil karena ukuran partikel yang besar dapat menyebabkan penumpukan material *coating* pada permukaan logam.
2. Optimalisasi teknik pelapisan perlu dilakukan agar hasil *coating* yang diperoleh lebih merata, baik dari segi ketebalan maupun kestabilan permukaan.
3. Analisis komposisi material Ni-SiO_2 hasil sintesis perlu dilakukan agar dapat diketahui pengaruh komposisi material dengan sifat antikorosinya.

4. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan uji daya rekat (adhesi) terhadap lapisan Ni-SiO₂ pada substrat logam besi.
5. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan metode pelapisan yang tidak memerlukan pemanasan, guna mempermudah proses aplikasi *coating*.

DAFTAR PUSTAKA

- A'yuni, Q., Rahmayanti, A., Hartati, H., Purkan, P., Subagyo, R., Fuadah, S., Sholeha, N. A., Bahruji, H., & Hikmat, H. 2023. *Transforming Volcanic Mud into Mesoporous Silica Xerogel and its Performance for Efficient Humidity Adsorption*. Journal of Saudi Chemical Society. 27(6). <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2023.101771>
- Andnindyara, W. 2016. *Analisis Laju Korosi Paduan Mg-Ca-Zn sebagai Material Implan Tulang dengan Metode Potensiostat pada Simulated Body Fluids (SBF)*. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Anisara, R., W., G. A. P. K., & Taufiq, A. 2024. *Silica Gel from Bagasse Ash for Methylene Blue Adsorption*. Jurnal Sains Natural. 14: 142–153.
- Arga, B. D. 2018. *Analisis Uji Ketahanan Coating Nanosilika dan Geopolimer sebagai Ketahanan Panas dan Korosi pada Baja Astm A36*. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- ASTM Handbook. 2003. *Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*. Vol 3. USA: ASTM International
- Azmi, N. 2018. *Studi Kasus pada Aluminium Tipe 2024-T4 dan 7075-T6 sebagai Kandidat Material Struktur Lavatory Modul Pesawat Boeing 737NG*. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

- Azmiyati, U., & Jannah, W. 2021. *Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Anorganik*. Indonesian Journal of Engineering. 1(6): 95–104.
- Azmiyawati, C., Niami, S. S., & Darmawan, A. 2019. *Synthesis of Silica Gel from Glass Waste for Adsorption of Mg^{2+} , Cu^{2+} , and Ag^+ Metal Ions*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 509(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012028>
- Budiarto. 2022. *Pengaruh Temperatur Kalsinasi Terhadap Gugus fungsi, Struktur Mikro, dan Kerapatan dislokasi pada Material Katoda Baterai $LiNiO_2$* . Journal Of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials And Energy. 6(2): 137-154.
- Bokov, D., Turki Jalil, A., Chupradit, S., Suksatan, W., Javed Ansari, M., Shewael, I. H., Valiev, G. H., & Kianfar, E. 2021. *Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application*. Advances in Materials Science and Engineering. 2021:1-21
<https://doi.org/10.1155/2021/5102014>
- Brady, G. S. 2002. *Materials Handbook*. Fifteenth Edition. New York : McGraw-Hill Company.
- Callister, William D., Jr. 2018. *Materials Science and Engineering: an Introduction*. 10th edition. Hoboken, NJ: Wiley

- Darmawi, Dewi, T. K., Alian, H., & Ginting, K. 2022. *Ahli Korosi Dasar*. Palembang: UPT. Penerbit dan Percetakan Universitas Sriwijaya
- Dewa, E., & Pasaribu, R. 2020. *Analisis Kandungan Silikon Dioksida (SiO₂) Pasir Pantai Koka Kabupaten Sikka dengan Metode Ekstraksi*. Prosiding Seminar Nasional Fisika PPs UNM. Jurnal Fisika PPs UNM. 2: 76–79.
- Dzulfaroh, A.N. 2019. *Hari Ini dalam Sejarah: Mengenang Tragedi Amruknya Jembatan Mahakam*. <https://www.kompas.com/tren/read/2019/11/26/052900765/hari-ini-dalam-sejarah--mengenang-tragedi-ambruknya-jembatan-mahakam?page=all>, diakses 4 April 2024
- Fan, C., Wang, X., Yin, X., Huang, W., Da, Y., Jiang, H., Cao, J., Gai, Y., & Zhang, W. 2023. *Adhesion Strength and Anti-Corrosion Performance of Ceramic Coating on Laser-Textured Aluminum Alloy*. Coatings. 13(12). <https://doi.org/10.3390/coatings13122098>
- Fernandez, R., Imbriglio, S., Chromik, R., & Jodoin, B. 2021. *The Role of Substrate Preheating on the Adhesion Strength of Cold-Sprayed Soft Particles on Hard Substrates*. Journal of Thermal Spray Technology. 30(3): 655–667. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01148-w>

- Figueira, R. B. 2020. *Hybrid Sol-Gel Coatings for Corrosion Mitigation: A Critical Review*. Polymers. 12(3): 9–12.
<https://doi.org/10.3390/polym12030689>
- Fontana, Mars G. 1987. *Corrosion Engineer*. Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- Gapsari, F. 2017. *Pengantar Korosi*. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Gautam, A., Siva, T., Sathiyarayanan, S., Gobi, K. V., & Subasri, R. 2022. *Capped Inhibitor-Loaded Halloysite Nanoclay-Based Self-Healing Silica Coatings for Corrosion Protection of Mild Steel*. Ceramics International. 48(20): 30151–30163. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.288>
- Gharbi, O., Thomas, S., Smith, C., & Birbilis, N. 2018. *Chromate Replacement: What Does The Future Hold*. Npj Materials Degradation. 2(1): 23–25.
<https://doi.org/10.1038/s41529-018-0034-5>
- Giurlani, W., Berretti, E., Innocenti, M., & Lavacchi, A. 2020. *Measuring The Thickness of Metal Coatings: A Review of The Methods*. Coatings. 10(12): 1–36.
<https://doi.org/10.3390/coatings10121211>
- Hendra. 2018. *Pipa Air Baku Bocor Akibat Korosi*.
<https://korankaltara.com/pipa-air-baku-bocor-akibat-korosi>, diakses 3 April 2024

- Hidayat, W. 2017. *Analisis Pengaruh Penambahan Unsur Nikel (Ni) terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi Paduan Tembaga Nikel (Cu-Ni) sebagai Material Alternatif Untuk Pengecoran Ball Valve*. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Huang, Z., Yong, Q., & Xie, Z. H. 2023. *Stearic Acid Modified Porous Nickel-Based Coating on Magnesium Alloy AZ31 for High Superhydrophobicity and Corrosion Resistance*. *Corrosion Communications* 10: 38–47.
<https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.09.002>
- Irawan, H. 2016. *Analisis Pengaruh Post-annealing pada Proses Pelapisan Ni-Al dan FeCrBMnSi dengan Metode Twin Wire Arc-Spraying (TWAS) terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik*. Tesis. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- John, V. L., Nair, Y., & Vinod, T. P. 2021. *Doping and Surface Modification of Carbon Quantum Dots for Enhanced Functionalities and Related Applications*. *Particle and Particle Systems Characterization*. 38(11): 1–28.
<https://doi.org/10.1002/ppsc.202100170>
- Ladjar, B.M.W. 2020. *Puslabfor: Gedung Roboh di Slipi karena Korosi Struktur Beton*.
<https://megapolitan.kompas.com/read/2020/01/07/15060201/puslabfor-gedung-robok-di-slipi-karena-korosi->

[struktur-beton](#), diakses 3 April 2024

- Larsson, A. 2023. *The Formation and Breakdown of Passive Film on Ni Alloys: in Situ Synchrotron Studies*. Sweden: Lund University
- Liu, Z., Zhang, B., Yu, H., Zhang, Z., Jiang, W., & Ma, Z. 2022. *A Smart Anticorrosive Epoxy Coating Based on Graphene Oxide/Functional Mesoporous Silica Nanoparticles for Controlled Release of Corrosion Inhibitors*. *Coatings*. 12(11). <https://doi.org/10.3390/coatings12111749>
- Löwemark, L., Bloemsma, M., Croudace, I., Daly, J. S., Edwards, R. J., Francus, P., Galloway, J. M., Gregory, B. R. B., Steven Huang, J. J., Jones, A. F., Kylander, M., Luo, Y., MacLachlan, S., Ohlendorf, C., Patterson, R. T., Pearce, C., Profe, J., Reinhardt, E. G., Stranne, C., ... Turner, J. N. 2019. *Practical Guidelines and Recent Advances in The Itrax XRF Core-Scanning Procedure*. *Quaternary International*. 514: 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.044>
- Martin, K. R. 2013. *Silicon: The Health Benefits of a Metalloid*. 451–473. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8>
- Martinović, I., & Pilić, Z. 2021. *Corrosion Behavior of Copper, Tin and Bronze Cusn14 in Acid Rain Solution*. *Materials and Corrosion*. 72(10): 1635–1642. <https://doi.org/10.1002/maco.202112470>

- Mladenović, I. O., Nikolić, N. D., Jovanov, V., Radovanović, Ž. M., Obradov, M. M., Vasiljević-Radović, D. G., & Vuksanović, M. M. 2024. *Influence of SiO₂ Nanoparticles Extracted from Biomass on the Properties of Electrodeposited Ni Matrix Composite Films on Si(100) Substrate*. Materials. 17(16). <https://doi.org/10.3390/ma17164138>
- Mujiyanti, D. R., Surianthy, M.D., Junaidi, A. 2020. *Kajian Karakterisasi Nanosilika dari Tetraethylorthosilicate (TEOS) dengan Penambahan Polivinil Alkohol (PVA) Menggunakan Scanning Electron Microscopy dan Particle Size Analyzer*. Jurnal Fisika Flux. 16(2): 1–6.
- Munir, S., Pelletier, M. H., & Walsh, W. R. 2016. *Potentiodynamic corrosion testing*. Journal of Visualized Experiments 2016(115): 1–6. <https://doi.org/10.3791/54351>
- Nasution, M. 2019. *Kajian Tentang Hubungan Deret Volta dan Korosi Serta Penggunaannya Dalam Kehidupan Sehari-Hari*. Seminar Nasional Teknik (SEMNASTEK) UISU. 251–254.
- Nursanti A. M., & Syafira A. P. 2022. *Studi Literatur: Perkembangan Nanomaterial*. Berkala Fisika. 25(3): 111–121. https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala_fisika/article/view/50741
- Oscik. 1982. *Adsorption*. England: Ellis Horwood Ltd Palar.

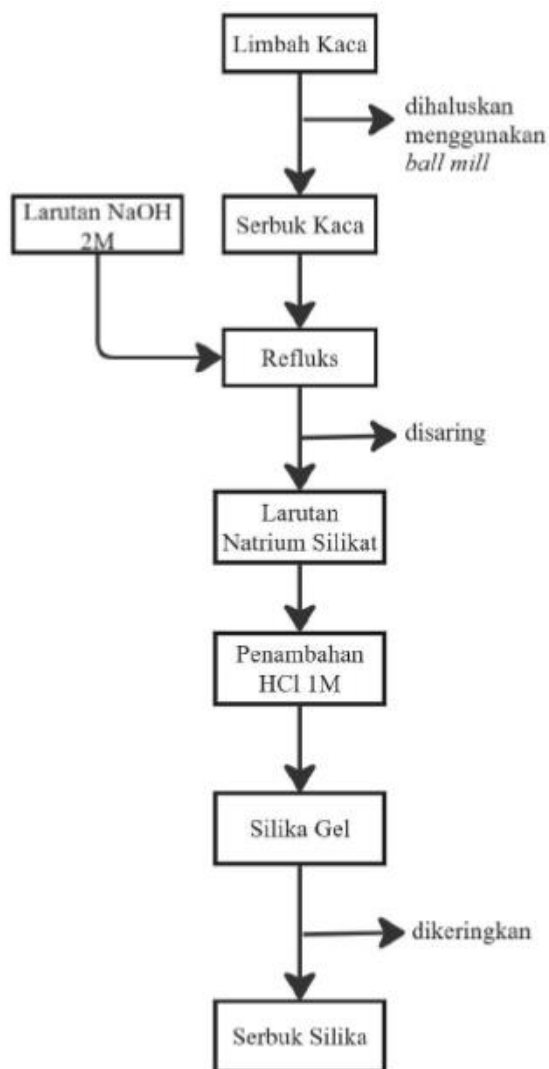
- Othman, N. K., Awizar, D. A., & Dasuki, Z. 2017. *Nano-Silicate from Paddy Waste as Natural Corrosion Inhibitor*. Rice Technology and Production. <https://doi.org/10.5772/67378>
- Peng, B., & Liu, S. 2021. *Selection of Particle Size Analysis Methods in Soil Science*. Scientific Journal of Technology. 3(5): 8–11.
- Pradeepkumar, S., Yassin, M. M., Marimuthu, S., Kalarani, M. K., Thiyageshwari, S., & Gurumeenakshi, G. 2023. *Eco-friendly Synthesis and Characterization of Amorphous Nanosilica from Rice Husk*. Agricultural Science Digest. 43(6): 790–795. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5792>
- Pramanick, A. K. 2015. *Synthesis Characterization and Properties of Silica-Nickel Nanocomposites through Chemical Route*. Journal of Engineering Research and Applications. 5(7): 62–73.
- Prayoga, Y. 2023. *Membangun Infrastruktur demi Kemaslahatan Umat*. <https://lampung.nu.or.id/opini/membangun-infrastruktur-demi-kemaslahatan-umat-QnTxd>, diakses 30 Oktober 2024
- Putra Reza, H. S. F. S. 2018. *Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Potensi Korosi pada Pipa Air Bawah Tanah di Jalur Krueng Peusangan hingga Krueng Geukueh , Aceh*.

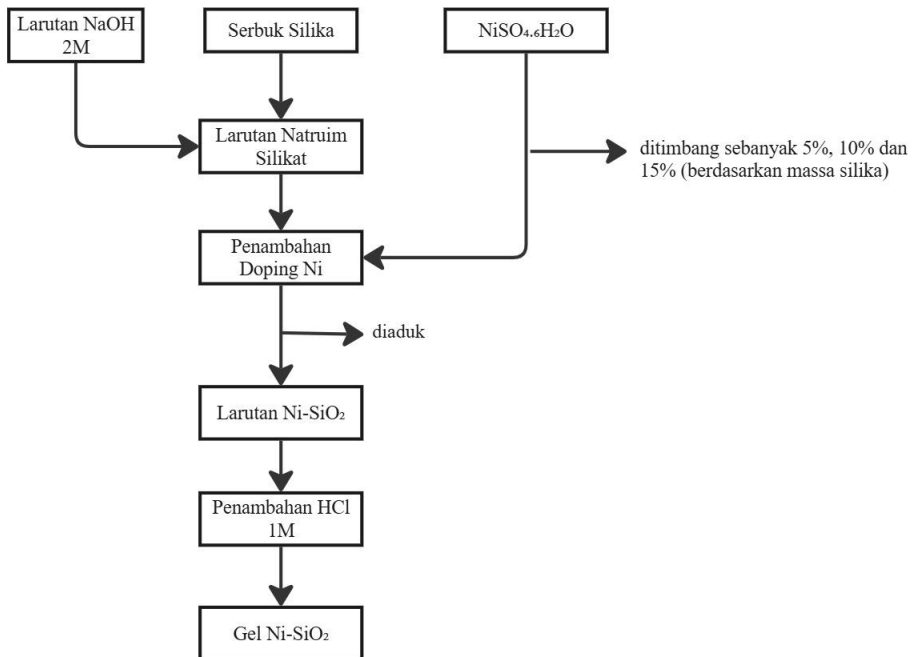
- Jurnal Teknik Mesin Untirta. 4(1): 14–19.
<http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jwl>
- Rajkumar, R., & Vedhi, C. 2019. *A Study of Corrosion Protection Efficiency of Silica Nanoparticles Acrylic Coated on Mild Steel Electrode*. Vacuum. 161: 1–4.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.12.005>
- Ramadhan M. 2019. *Pengaruh Waktu Penggilingan Material Alumunium terhadap Bulir yang Dihasilkan dengan Menggunakan Mesin Bola Penghancur/Ball Milling*. Skripsi. Medan: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
- Ramadani, K. 2018. *Sintesis dan Karakterisasi Silika Gel dari Limbah Kaca untuk Menurunkan Kesadahan Air*. Saintifik. 4(2): 179–185.
<https://doi.org/10.31605/saintifik.v4i2.183>
- Reddy, R. G., & Balasubramanian, S. 2015. *Synthesis, Characterization and Photocatalytic Studies of Mesoporous Silica Grafted Ni(II) and Cu(II) Complexes*. RSC Advances. 2015: 1-21.
- Reddy, R. G., Shinde, P. S., & Liu, A. 2021. *Review The Emerging Technologies for Producing Low-Cost Titanium*. Journal of The Electrochemical Society. 168(4).
<https://doi.org/10.1149/1945-7111/abe50d>

- Ridwan, R. 2021. *Tumpahan Minyak di Dumai Akibat Korosi Pipa*.
<https://ekonomi.bisnis.com/read/20210302/44/1362679/skk-migas-tumpahan-minyak-dumai-akibat-korosi-pada-pipa>, diakses 4 April 2024
- Saptari, S. A., & Yudianti, R. 2018. *Ketahanan Oksidasi Lapisan Aluminium Practical Grade dan Aluminium Scrap pada Baja Karbon menggunakan Metode Pack Cementation*. Skripsi. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah
- Shuca, Y., Chunsheng, H., & Minli, Z. 2019. *A Prediction Model for Titanium Alloy Surface Roughness when Milling with Micro-Textured Ball-End Cutters at Different Workpiece Inclination Angles*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 100(5–8): 2115–2122.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2852-6>
- Silla, H. 2003. *Chemical Process Engineering*. New Jersey: Stevens Institute of Technology
<https://doi.org/10.1201/9780203912454.ch6>
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. 2021. *Silicon and Plants: Current Knowledge and Future Prospects*. *Journal of Plant Growth Regulation*. 40(3): 906–925.
<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>

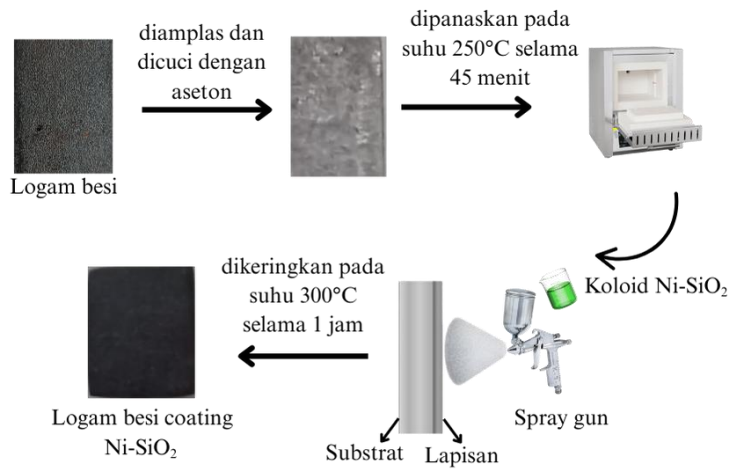
- Suharto, S., Amin, M., Al Muttaqii, M., Marjunus, R., Fitri, N., & Suhartono, S. 2021. *Analysis of Fine Glass Waste Addition as a Filler Material for Sand Substitution on the Properties of Mortar Products*. Teknik. 42(1): 309–315.
<https://doi.org/10.14710/teknik.v42i3.32686>
- Sunarsih, E. 2014. *Konsep Pengolahan Limbah Rumah Tangga Dalam Upaya Pencegahan Pencemaran Lingkungan Concept of Household Waste in Environmental Pollution Prevention Efforts*. Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat. 5(3): 162–167.
<http://ejournal.fkm.unsri.ac.id/index.php/jikm/article/view/158>
- Tkachenko, Y., & Niedzielski, P. 2022. *FTIR as a Method for Qualitative Assessment of Solid Samples*. Molecules. 27(8846).
- Wardiyati, S., Ari Adi, W., Didin Sahidin Winatapura. 2018. *Sintesis dan Karakterisasi Microwave Absorbing Material Berbasis Ni-SiO₂ dengan Metode Sol-Gel*. Jurnal Fisika. 8(2): 51–59.
- Wasim, M., Shoaib, S., Mubarak, N. M., Inamuddin, & Asiri, A. M. 2018. *Factors Influencing Corrosion of Metal Pipes in Soils*. Environmental Chemistry Letters. 16(3): 861–879.
<https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>

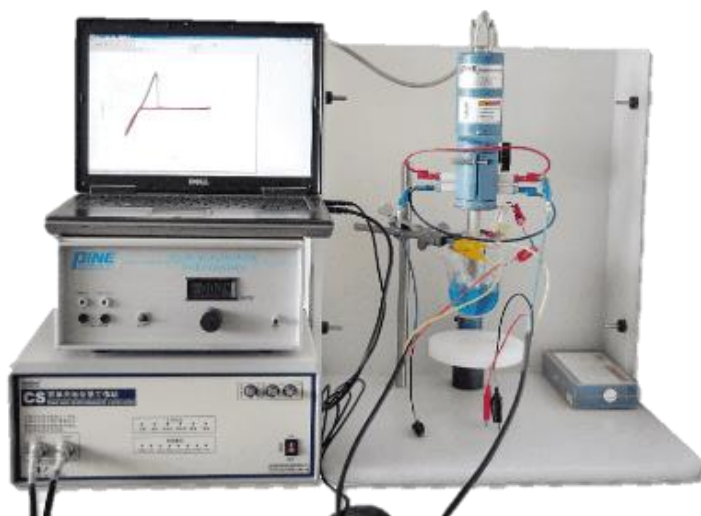
- Wu, Z., Chen, Y., Liu, H., Hua, W., Duan, J., & Kong, L. 2023. *A Review of the Developments of the Characteristics and Mechanisms of Airless Spraying on Complex Surfaces*. Coatings. 13(12). <https://doi.org/10.3390/coatings13122095>
- Xu, X., Zhou, Y., Liu, L., Guo, P., Li, X., Lee, K. R., Cui, P., & Wang, A. 2020. *Corrosion Behavior of Diamond-Like Carbon Film Induced by Al/Ti co-Doping*. Applied Surface Science. 144877. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144877>
- Yuristia, R. B. 2019. *Pengaruh Variasi Konsentrasi dan Waktu Perendaman Terhadap Baja API 5L Grade B dalam Media NaCl 3,5% Menggunakan Inhibitor Ekstrak Biji Alpukat*. Skripsi. Surabaya: Institut Telnologi Sepuluh Nopember

LAMPIRAN**Lampiran 1** Diagram Alir Sintesis Silika dari Limbah Kaca

Lampiran 2 Diagram Alir Sintesis Ni-SiO₂

Lampiran 3 Proses Pelapisan Logam Fe



Lampiran 4 Rangkaian Alat Uji Korosi

Lampiran 5 Perhitungan Penambahan Doping Ni

- Ni-SiO₂ 5%

Massa Silika: 10 gram

$$\frac{5}{100} \times 10 \text{ gram} = 0,5 \text{ gram}$$

Untuk mengetahui 0,5 gram Ni dari NiSO_{4.6}H₂O maka:

$$\frac{0,5 \text{ gr}}{x} = \frac{Ar \text{ Ni}}{Mr \text{ NiSO}_{4.6}\text{H}_2\text{O}}$$

$$\frac{0,5 \text{ gr}}{x} = \frac{59 \text{ gr/mol}}{262,84 \text{ gr/mol}}$$

$$x = \frac{262,84 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 0,5 \text{ gr}}{59 \text{ gr/mol}}$$

$$x = 2,2275 \text{ gram}$$

Untuk membuat Ni-SiO₂ 5% dibutuhkan 2,2275 gram NiSO_{4.6}H₂O dan 9,5 gram silika.

- Ni-SiO₂ 10%

Massa Silika: 10 gram

$$\frac{10}{100} \times 10 \text{ gram} = 1 \text{ gram}$$

Untuk mengetahui 1 gram Ni dari NiSO_{4.6}H₂O maka:

$$\frac{1 \text{ gr}}{x} = \frac{Ar \text{ Ni}}{Mr \text{ NiSO}_{4.6}\text{H}_2\text{O}}$$

$$\frac{1 \text{ gr}}{x} = \frac{59 \text{ gr/mol}}{262,84 \text{ gr/mol}}$$

$$x = \frac{262,84 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 1 \text{ gr}}{59 \text{ gr/mol}}$$

$$x = 4,4549 \text{ gram}$$

Untuk membuat Ni-SiO₂ 10% dibutuhkan 4,4549 gram NiSO_{4.6}H₂O dan 9 gram silika.

- Ni-SiO₂ 15%

Massa Silika: 10 gram

$$\frac{15}{100} \times 10 \text{ gram} = 1,5 \text{ gram}$$

Untuk mengetahui 1,5 gram Ni dari NiSO_{4.6}H₂O maka:

$$\frac{1,5 \text{ gr}}{x} = \frac{Ar \text{ Ni}}{Mr \text{ NiSO}_{4.6}\text{H}_2\text{O}}$$

$$\frac{1,5 \text{ gr}}{x} = \frac{59 \text{ gr/mol}}{262,84 \text{ gr/mol}}$$

$$x = \frac{262,84 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 1,5 \text{ gr}}{59 \text{ gr/mol}}$$

$$x = 6,6824 \text{ gram}$$

Untuk membuat Ni-SiO₂ 15% dibutuhkan 6,6824 gram NiSO_{4.6}H₂O dan 8,5 gram silika.

Lampiran 6 Perhitungan Nilai Span

$$Span = \frac{D90 - D10}{D50}$$

$$Span = \frac{82,124 - 21,208}{41,738}$$

$$Span = 1,459$$

Lampiran 7 Perhitungan Efisiensi Inhibisi Korosi

- Efisiensi Inhibisi Si

$$\%IE = \frac{0,47565 - 0,01036}{0,47565} \times 100\%$$

$$\%IE = 59,05\%$$

- Efisiensi Inhibisi Ni-SiO₂ 5%

$$\%IE = \frac{0,47565 - 0,01036}{0,47565} \times 100\%$$

$$\%IE = 66,83\%$$

- Efisiensi Inhibisi Ni-SiO₂ 10%

$$\%IE = \frac{0,47565 - 0,01036}{0,47565} \times 100\%$$

$$\%IE = 74,44\%$$

- Efisiensi Inhibisi Ni-SiO₂ 15%

$$\%IE = \frac{0,47565 - 0,01036}{0,47565} \times 100\%$$

$$\%IE = 97,82\%$$

Lampiran 8 Dokumentasi Penelitian

Gambar	Keterangan
	<i>Ball Milling</i>
	Serbuk Kaca
	Set Alat Refluks

		Silika Gel
		Serbuk Silika
		Koloid Ni-SiO ₂
		<i>Spray Gun</i>

		Logam Besi Sebelum Pelapisan	
		Logam Besi Setelah Pelapisan Si	
 Ni-SiO ₂ 5%	 Ni-SiO ₂ 10%	 Ni-SiO ₂ 15%	Logam Besi Setelah Pelapisan Ni- SiO ₂

RIWAYAT HIDUP

A. Identitas Diri

1. Nama Lengkap : Roha Aria Wardani
2. Tempat , Tgl Lahir : Kab. Semarang, 01 Juli 2003
3. Alamat Rumah : Dusun Gemawang, Desa Munding, Kec. Bergas, Kab. Semarang, Jawa Tengah
4. Hp : 089513760940
5. E-mail : rohaaria@gmail.com

B. Riwayat Pendidikan

1. SD Negeri Munding
2. MTs Nurul Amal
3. MA Nurul Amal

Semarang, 03 Juni 2025



Roha Aria Wardani
NIM. 2108036083