

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan bahan konstruksi yang telah banyak digunakan untuk pembangunan gedung, jembatan, jalan, dan lain-lain (Kangavar et al., 2023). Beton mempunyai peranan yang sangat penting untuk konstruksi karena memiliki kelebihan yaitu dapat menahan gaya tekan dengan baik, tetapi beton juga memiliki kekurangan yaitu lemah terhadap kuat tarik, sehingga beton diperkuat dengan material baja tulangan yang membentuk suatu material yang komposit dan disebut dengan beton bertulang. Namun, salah satu yang mengakibatkan turunnya kekuatan tarik dari baja tulangan adalah korosi. Korosi terjadi ketika lapisan pasif di permukaan baja tulangan rusak akibat penetrasi ion agresif seperti ion klorida ke dalam beton, sehingga memicu reaksi elektrokimia yang mempercepat oksidasi baja. Korosi ini tidak hanya mengurangi luas penampang baja tulangan, tetapi juga dapat menimbulkan retak dan *spalling* pada beton, sehingga menurunkan kapasitas struktural elemen beton bertulang secara signifikan (Sigit Maulana et al., 2024).

Beton banyak digunakan sebagai bahan konstruksi, tetapi beton konvensional cenderung mengalami retak seiring waktu karena ekspansi atau kontraksi yang disebabkan oleh perubahan suhu dan kelembaban. Oleh karena itu, pengembangan alternatif beton yang lebih tahan lama terus menjadi fokus utama dalam penelitian material konstruksi, salah satunya adalah Beton Memadat Sendiri (BMS). BMS memiliki kemampuan untuk mengalir dan memadat tanpa memerlukan vibrasi eksternal, menghasilkan distribusi material yang lebih seragam dan struktur mikro yang rapat, sehingga berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion agresif serta mempengaruhi kecepatan korosi baja tulangan (Wang et al., 2025). Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian Fahmy (2022) yang menunjukkan bahwa beton memadat sendiri (BMS) dengan penambahan nanopartikel limbah kaca (NWG) dan nanopartikel limbah keramik (NWC) mampu memberikan peningkatan ketahanan korosi yang signifikan pada baja tulangan. Pada kondisi *self-curing*, laju korosi baja tulangan tercatat menurun hingga sekitar 87% pada campuran dengan NWG dan 82% pada campuran dengan NWC dibandingkan dengan beton tanpa nanopartikel. Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan nanopartikel dalam campuran BMS berperan efektif dalam menghambat proses korosi dan meningkatkan durabilitas beton bertulang (Fahmy et al., 2022).

Peningkatan pembangunan infrastruktur mendorong pertumbuhan aktivitas industri, sehingga volume limbah industri yang dihasilkan juga mengalami peningkatan. Salah satu jenis limbah industri yang cukup besar di Indonesia adalah terak (slag) nikel. Berdasarkan data Sela menyatakan bahwa produksi bijih nikel Indonesia pada tahun 2024 sebesar 173,63 juta ton atau sekitar 61,6% dari produksi total nikel di dunia. Besarnya produksi ini sejalan dengan limbah yang dihasilkan yaitu terak (slag) dari hasil pengolahan nikel. Apabila tidak dikelola dan dimanfaatkan secara tepat, akumulasi terak nikel berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan.

Berdasarkan hal tersebut, pemanfaatan slag nikel sebagai bahan substitusi dalam campuran beton menjadi solusi strategis yang tidak hanya mendukung pembangunan nasional, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap pelestarian lingkungan. Slag nikel memiliki karakteristik fisik dan kimia yang dapat memperbaiki kinerja beton. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemanfaatan slag nikel sebagai substitusi agregat halus pada BMS mampu meningkatkan kekuatan tekan dan kepadatan struktur mikro beton, tanpa mengurangi pemenuhann parameter beton segar, serta menghasilkan kinerja mekanik yang memadai (Selang et al., 2024).

Perbaikan struktur mikro beton akibat penggunaan slag nikel diperkirakan dapat mempengaruhi laju korosi baja tulangan. Beton dengan struktur mikro yang lebih padat cenderung menghambat penetrasi ion agresif seperti klorida dan air, sehingga diharapkan slag nikel dapat memberikan kontribusi terhadap perlambatan laju korosi tulangan dalam beton. Slag nikel mengandung mineral stabil seperti kalsium oksida (CaO), silikon dioksida (SiO_2) yang mirip dengan fase dikalsium silikat dan memiliki ciri khas kepadatan yang tinggi. Penambahan slag nikel pada campuran beton mampu meningkatkan kepadatan beton sebesar 6,7-21,9% dan peningkatan tertinggi terjadi pada penambahan slag halus yaitu sebesar 20% (Pelupessy et al., 2024). Selain itu, slag nikel juga mengandung besi oksida (FeO) yang berfungsi sebagai pengikat dalam matriks beton, meningkatkan daya tahan terhadap tekanan dan pengaruh lingkungan eksternal.

Pada penelitian ini dilakukan pemanfaatan slag nikel dari PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia sebagai substitusi agregat halus pada BMS ramah lingkungan yang kuat dan tahan lama. Kajian ini diharapkan dapat menjawab tantangan minimnya penelitian terdahulu terkait pengaruh laju korosi baja tulangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik laju korosi baja tulangan yang menggunakan slag nikel sebagai pengganti agregat halus berdasarkan nilai *half-cell potential* dengan metode akselerasi korosi beton. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis sekaligus berkontribusi dalam upaya pemanfaatan limbah industri sebagai material konstruksi yang ramah lingkungan dan berkinerja tinggi.

Berdasarkan hal tersebut, disusunlah tugas akhir dengan judul **“PENGARUH SLAG NIKEL TERHADAP LAJU KOROSI BAJA TULANGAN PADA BETON MEMADAT SENDIRI (BMS)”**.

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah yang dapat diambil sebagai berikut;

1. Bagaimana pengaruh penggunaan slag nikel sebagai substitusi agregat halus terhadap laju korosi baja tulangan pada beton memadat sendiri (BMS)?
2. Bagaimana karakteristik laju korosi baja tulangan pada beton memadat sendiri (BMS) yang menggunakan slag nikel sebagai pengganti agregat

halus berdasarkan hasil pengujian *half-cell potential* dengan metode akselerasi korosi beton?

3. Bagaimana nilai kuat lekat beton memadat sendiri (BMS) setelah akselerasi korosi melalui pengujian *pull out*?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan slag nikel sebagai substitusi agregat halus terhadap laju korosi baja tulangan pada beton memadat sendiri (BMS).
2. Untuk menganalisis karakteristik laju korosi baja tulangan pada beton memadat sendiri (BMS) yang menggunakan slag nikel sebagai pengganti agregat halus berdasarkan hasil pengujian *half-cell potential* dengan metode akselerasi korosi beton.
3. Untuk memberikan gambaran nilai kuat lekat beton memadat sendiri (BMS) setelah akselerasi korosi melalui pengujian *pull out*.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Memberikan solusi pemanfaatan slag nikel hasil limbah industri sebagai material alternatif pengganti agregat halus pada Beton Memadat Sendiri (BMS) dalam rangka mendukung pengelolaan limbah dan pengembangan material konstruksi berkelanjutan.
2. Memberikan referensi ilmiah terkait pengaruh penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat halus pada Beton Memadat Sendiri (BMS) terhadap laju korosi baja tulangan menggunakan metode akselerasi korosi beton.

1.1.4 Batasan Masalah

Dalam suatu penelitian, tentunya terdapat hal penting yang menjadi fokus utama. Fokus utama penelitian dapat diperoleh secara lebih sistematis dan tidak meluas dengan cara memberikan batasan masalah terhadap hal-hal yang perlu ditinjau dalam melakukan penelitian. Batasan-batasan masalah dalam penelitian ini antara lain;

1. Slag nikel yang digunakan adalah limbah dari pabrik smelter nikel milik PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia (HNI) yang berlokasi di Kawasan Industri Bantaeng (KIBA).
2. Slag nikel sebagai pengganti agregat halus lolos saringan No. 4 (4,75 mm).
3. Variasi persentase slag nikel sebagai pengganti agregat halus yang digunakan sebesar 0%, 50%, 70%, dan 100%.
4. Penelitian bersifat eksperimental dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan SNI dan ASTM.

5. Penelitian ini difokuskan pada skala laboratorium dan belum mencakup pengujian struktural penuh dalam bentuk elemen struktur.
6. Uji laju korosi menggunakan metode akselerasi korosi beton setelah proses *water curing* 28 hari.

1.2 Teori

1.2.1 Beton Memadat Sendiri (BMS)

Beton Memadat Sendiri (BMS) adalah jenis beton segar yang memiliki kemampuan untuk mengalir, mengisi cetakan, dan memadat di sekitar tulangan tanpa memerlukan pemadatan mekanis, seperti vibrasi, serta tanpa mengalami segregasi maupun *bleeding*. Konsep BMS pertama kali dikembangkan di Jepang pada tahun 1986 oleh Okamura dan Ouchi untuk mengatasi permasalahan pemadatan beton pada struktur dengan tulangan rapat dan untuk meningkatkan kualitas konstruksi beton. Menurut *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC), BMS didefinisikan sebagai beton yang dapat mengalir di bawah beratnya sendiri, sepenuhnya mengisi bekisting, melewati celah tulangan yang rapat, serta mempertahankan homogenitasnya tanpa segregasi selama proses pengecoran. Definisi ini menjadi acuan utama dalam berbagai standar nasional, termasuk Standar Nasional Indonesia (SNI).

Menurut SNI 2847:2019 (Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung), BMS diakui sebagai beton dengan karakteristik khusus yang harus memenuhi persyaratan beton segar tertentu agar mampu memadat tanpa pemadatan mekanis. Menurut Okamura dan Ouchi (2003), satu solusi untuk mendapatkan suatu struktur beton tahan lama yang terikat pada kemampuan pekerjaan konstruksi adalah kemampuan sendiri beton untuk memadat, yang dapat mengalir ke dalam tiap-tiap sudut suatu cetakan, karena berat sendiri tanpa bantuan alat penggetar, dengan komposisi campuran agregat kasar 50% dari volume beton, agregat halus 40% dari volume mortar dan faktor air semen antara 0,25-0,40 (Hajime & Masahiro, 2003). Tingkat kecairan BMS yang tinggi dipengaruhi oleh penambahan *superplastisizer*, yang berfungsi untuk meningkatkan kelecakan beton tanpa harus menambah kadar air dalam campuran. *Superplastisizer* bekerja dengan mendispersikan partikel semen yang semula menggumpal, sehingga air dalam campuran dapat tersebar lebih efektif dan berperan sebagai pelumas. Mekanisme ini memungkinkan beton memiliki kemampuan mengalir yang baik, mengisi cetakan, dan melewati tulangan yang rapat hanya dengan beratnya sendiri tanpa memerlukan pemadatan mekanis.

Kelebihan BMS antara lain sangat encer, memiliki nilai *slump* tinggi dalam jangka waktu lama (*slump keeping admixture*), tidak memerlukan pemadatan manual, lebih homogen dan stabil, kuat tekan bisa dibuat untuk mutu beton tinggi, lebih kedap, porositas lebih kecil, dan susut lebih rendah, lebih awet, permukaan beton lebih baik dan halus, polusi suara rendah dan tenaga kerja sedikit. Proporsi material BMS berdasarkan EFNARC seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Proporsi jumlah material penyusun BMS

Material	Batas dalam berat (kg/m³)
Semen	380-600
Air	150-200
Agregat Kasar	750-200
Agregat Halus	48-55% dari berat agregat

Sumber: (EFNARC, 2005)

Secara ilmiah, BMS dirancang dengan kombinasi proporsi agregat halus yang lebih tinggi, penggunaan *superplasticizer*, dan pengendalian viskositas pasta semen untuk mencapai keseimbangan antara kemampuan mengalir (*flowability*), kemampuan melewati tulangan (*passing ability*), dan ketahanan terhadap segregasi (*segregation resistance*). Struktur mikro BMS yang lebih rapat dan homogen menjadikannya berpotensi memiliki durabilitas yang lebih baik, termasuk ketahanan terhadap penetrasi ion agresif yang berpengaruh pada korosi baja tulangan.

1.2.2 Material Penyusun Beton Memadat Sendiri (BMS)

1.2.2.1 Semen Portland Komposit (PCC)

Portland Composite Cement (PCC) adalah jenis semen hidrolik yang dibuat dengan mencampurkan klinker semen portland dengan bahan tambahan lain yang bukan klinker, seperti pozzolan, batu kapur, atau slag. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) tentang semen portland komposit (SNI 15-7064-2004), PCC merupakan bahan pengikat hidrolis yang terdiri dari campuran bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain pozzolan, senyawa silikat, batu kapir dan terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), dengan kadar total bahan anorganik sebesar 6% sampai 35% dari massa semen portland komposit. Penambahan bahan anorganik ini bertujuan untuk memperbaiki sifat fisik dan kimia semen, seperti meningkatkan kehalusan partikel, mengurangi panas hidrasi, serta memperbaiki mikrostruktur pasta semen sehingga beton menjadi lebih padat dan tahan lama. Pencampuran bahan tambah yang digunakan pada PCC bertujuan untuk memberikan peningkatan mutu, menurunkan porositas, mempercepat waktu pengerasan, dan meningkatkan ketahanan terhadap zat perusak di lingkungan agresif. Campuran ini dibuat dalam proporsi tertentu dan bertahan cukup baik terhadap lingkungan asam dan tahan terhadap sulfat ringan (Tajunnisa et al., 2023). Bahan tambah pada semen PCC akan reaktif saat bertemu dengan produk hidrasi semen yang kemudian akan menghasilkan silikat tambahan atau reaksi pozzolanik untuk meningkatkan kuat tekan dan kedapatan beton dan direkomendasikan untuk konstruksi di lingkungan agresif (Putra et al., 2020).

Salah satu campuran pada PCC adalah *limestone* (batu kapur) yang membuat campuran PCC dapat mengoptimasi (mengisi pori-pori) beton dengan maksimal dan membantu hidrasi *cementitious* (Kang et al., 2024). Fungsi utama semen adalah membentuk produk hidrasi, seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang memberikan kekuatan utama pada beton. Komposisi kimia utama PCC yang berperan dalam proses hidrasi tersebut disajikan secara rinci pada tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia semen

Komposisi Kimia	Kandungan (%)
Kalsium oksida (CaO)	60-65
Silikon dioksida (SiO ₂)	17-25
Aluminium oksida (Al ₂ O ₃)	3-8
Belerang trioksida (SO ₃)	1-2
Besi (III) oksida (Fe ₂ O ₃)	0,5-6
Magnesium oksida (MgO)	0,5-4
Natrium oksida/Kalium oksida (Na ₂ O + K ₂ O)	0,5-1

Selama proses pencampuran (reaksi hidrolisis), senyawa aktif dalam semen seperti trikalsium silikat (C₃S) dan dikalsium silikat (C₂S) bereaksi dengan air membentuk gel C-S-H dan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂ atau CH). Gel C-S-H ini berperan penting dalam pengembangan kekuatan mekanik dan kepadatan beton, sedangkan CH dapat memengaruhi ketahanan beton terhadap lingkungan agresif jika tidak dikendalikan dengan bahan tambahan pozzolan. Senyawa-senyawa utama dalam semen Portland beserta peranannya terhadap sifat beton ditampilkan pada tabel 3. Oleh karena itu, penggunaan bahan tambahan pozzolan seperti *fly ash*, slag, atau pozzolan alam dalam PCC menjadi penting karena mampu bereaksi dengan CH membentuk C-S-H sekunder, sehingga meningkatkan durabilitas beton, menurunkan porositas, mengurangi panas hidrasi, serta menekan emisi karbon dari proses produksi semen.

Tabel 3. Senyawa-senyawa utama pada semen *portland*

Nama Senyawa	Komposisi Kimia	Singkatan
Trikalsium silikat	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
Dikalsium silikat	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Trikalsium aluminat	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsium aluminoforit	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Sumber: (Ahmed et al., 2023)

PCC mengandung bahan tambahan nonklinker (hingga 35% sampai 40%) sesuai (SNI 7064:2022) yang artinya dapat mengurangi kebutuhan klinker, menekan konsumsi energi dan emisi CO₂ serta mendukung penggunaan limbah industri seperti *fly ash* atau slag sehingga mendaur ulang limbah menjadi material bernilai.

1.2.2.2 Agregat Kasar

Menurut SNI 1969:2016, agregat kasar dapat didefinisikan sebagai kerikil yang merupakan hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm sampai 40 mm. Agregat kasar pada BMS biasanya dibatasi jumlahnya sekitar kurang lebih 50% dari total volume beton supaya bisa mengalir dan memadat sendiri tanpa alat pemadat (EFNARCH, 2005). ASTM C33 mengatur batas gradasi agregat kasar yang digunakan dalam beton, sementara agregat kasar yang digunakan pada BMS

umumnya mengacu pada ukuran nominal 10 mm sampai 20 mm untuk menjaga *passing ability* dan *flowability* beton. Ketentuan gradasi agregat kasar dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Gradasi agregat kasar

Ayakan		Lolos Ayakan		
SNI (mm)	ASTM	Ukuran Maks. 10 mm	Ukuran Maks. 20 mm	Ukuran Maks. 40 mm
75,0	3 in	–	–	100 – 100
37,5	1 ½ in	–	100 – 100	95 – 100
19,0	3/4 in	100 – 100	95 – 100	35 – 70
9,5	3/8 in	50 – 85	30 – 60	10 – 40
4,75	No. 4	0 – 10	0 – 10	0 – 5

Sumber: (SNI 03-2834-2000 dan ASTM C33)

1.2.2.3 Agregat Halus

Menurut SNI 1969-2016, agregat halus dapat didefinisikan sebagai pasir alam yang merupakan hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir sebesar 4,75 mm (No. 4). Agregat halus memiliki ukuran partikel lolos ayakan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm). Pada BMS, agregat halus berperan dalam mengisi rongga di antara agregat kasar dan membentuk matriks mortar yang kontinu, sehingga menghasilkan struktur beton yang homogen. Keberadaan agregat halus dalam proporsi yang memadai berperan penting dalam meningkatkan kemampuan alir beton akibat pengaruh berat sendiri tanpa memerlukan pemadatan mekanis, sekaligus menjaga stabilitas campuran agar tidak terjadi segregasi selama proses pengecoran.

Penggunaan agregat halus dalam BMS umumnya lebih tinggi dibandingkan beton konvensional, karena BMS membutuhkan volume pasta dan fraksi butiran halus yang lebih besar untuk mencapai tingkat *flowability* dan *segregation resistance* yang optimal. Oleh karena itu, karakteristik agregat halus seperti gradasi butiran, bentuk dan tekstur permukaan, kebersihan, dan kadar partikel halus harus dikontrol secara ketat agar kinerja beton dapat tercapai secara optimal (Hidayatunnisa, 2025).

Persyaratan agregat halus yang dapat digunakan dalam campuran beton diatur dalam ASTM C33. Persyaratan untuk agregat halus tersebut antara lain:

1. Kandungan Zat Berbahaya

Agregat halus tidak boleh mengandung zat organik berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi merugikan yang dapat mengurangi kekuatan dan daya tahan beton.

2. Kebersihan Agregat

Agregat halus harus bebas dari kontaminasi bahan tambahan seperti bahan organik, lumpur, dan partikel halus yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari

5% (terhadap berat kering), jika kadar lumpur melampaui 5%, maka agregat halus harus dicuci.

3. Gradasi Agregat

Agregat halus terdiri dari butir-butir tajam dan keras. Agregat halus harus memiliki distribusi ukuran butiran yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang ditetapkan dalam ASTM C33 seperti yang disajikan pada tabel 5. Gradasi agregat yang baik dapat memberikan nilai kepadatan dan kohesi yang baik serta menghasilkan sifat mekanik yang optimal. Butir-butir halus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca. Sifat kekal agregat halus dapat di uji dengan larutan jenuh garam. Jika menggunakan natrium sulfat (Na_2SO_4), maka bagian yang hancur adalah 10% berat.

4. Reaktivitas Alkali

Agregat halus harus memiliki kestabilan kimia dan fisik yaitu tidak mengandung material reaktif terhadap alkali yang dapat menyebabkan ekspansi berlebih.

Tabel 5. Gradasi agregat halus

Ayakan		Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Agak Halus	Pasir Halus	Fine Agregate
SNI (mm)	ASTM	Gradasi No. 1	Gradasi No. 2	Gradasi No. 3	Gradasi No. 4	Sieve Analysis
9,6	3/8 in	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100
4,8	No. 4	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100	95 – 100
2,4	No. 8	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100	80 – 100
1,2	No. 16	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100	50 – 85
0,6	No. 30	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100	25 – 60
0,3	No. 50	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50	5 – 30
0,15	No. 100	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15	0 – 10

Sumber: (SNI 03-2834-2000 dan ASTM C33)

1.2.2.4 Slag Nikel

Menurut ASTM C618, slag adalah produk non metal yang merupakan material berbentuk halus sampai besar dari hasil pembakaran yang didinginkan. Selanjutnya, ASTM C33 menyatakan bahwa agregat untuk beton dapat berasal dari material alami maupun material buatan hasil proses industri, termasuk slag, selama memenuhi persyaratan mutu yang ditetapkan. Berdasarkan kedua standar tersebut, slag nikel sebagai material buatan hasil proses peleburan nikel dapat diklasifikasikan sebagai agregat beton. Slag nikel adalah limbah buangan dari industri pengolahan nikel yang menghasilkan material dalam fase cair bersuhu tinggi, kemudian mengalami pendinginan dan membentuk batuan alami yang terdiri dari slag padat dan berpori.



Gambar 1. Slag nikel (a) Sebelum *crushing* (b) Sesudah *crushing*)

Slag nikel seperti pada gambar 1 memiliki komponen utama yaitu silikon dioksida (SiO_2), magnesium oksida (MgO), besi (II) oksida (FeO), kalsium oksida (CaO). Slag berbentuk padatan berwarna abu-abu kehitaman hingga hitam mengkilap, dengan tekstur kasar dan struktur yang bervariasi. Secara fisik, slag nikel memiliki berat jenis sekitar 2,8 sampai 3,6, porositas rendah, penyerapan air yang kecil (2%), serta kekerasan dan kestabilan termal yang tinggi, sehingga menjadikannya material yang tahan terhadap beban dan lingkungan. Karakteristik tersebut membuat slag nikel berpotensi digunakan sebagai bahan substitusi agregat dalam campuran beton atau konstruksi lainnya. Berdasarkan hasil pengujian keausan menggunakan alat *Los Angeles Abrasion Test*, slag nikel menunjukkan nilai keausan sebesar 57,3%. Hal ini mengindikasikan bahwa slag nikel memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai material pengganti agregat halus dalam campuran beton. Slag nikel yang digunakan harus lolos ayakan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan pada ayakan No. 200 (0,075).

Menurut (Ahmad et al., 2022), slag nikel memiliki sejumlah karakteristik unggul yang menjadikannya berpotensi digunakan sebagai material pengganti agregat halus pada campuran beton yaitu:

1. Kekerasan tinggi dan bentuk butiran kasar, memberikan daya ikat mekanik lebih baik pada pasta semen.
2. Porositas dan penyerapan air yang rendah, yang berarti lebih sedikit air terserap oleh agregat sehingga menjaga rasio air-semen tetap stabil.
3. Stabilitas kimia yang baik, tidak bereaksi agresif dalam lingkungan laut
4. Daya tahan terhadap ion klorida, yang sangat penting untuk beton yang digunakan di wilayah pesisir atau laut.

Slag nikel sebagai material pengganti agregat halus dalam campuran BMS memiliki keunggulan dalam menghambat laju korosi baja tulangan. Karakteristik fisik slag nikel yang relatif padat dan memiliki gradasi halus memungkinkan material ini mengisi rongga mikro dalam matriks beton secara lebih efektif, sehingga menurunkan porositas dan permeabilitas beton (Gao et al., 2026). Penurunan permeabilitas tersebut berperan penting dalam membatasi penetrasi air, oksigen, serta ion agresif seperti klorida dan karbon dioksida yang merupakan faktor utama penyebab terjadinya korosi pada baja tulangan. Selain itu, tabel 6 menunjukkan

bahwa slag nikel mengandung senyawa silika dan oksida logam yang dapat berkontribusi terhadap pembentukan mikrostruktur beton yang lebih rapat dan homogen. Untuk membuktikan hal tersebut, maka dilakukan pengujian karakteristik slag nikel yang dapat dilihat pada tabel 7.

Menurut penelitian Sandra (2025), menyatakan bahwa beton dengan substitusi ferronickel slag menunjukkan penurunan penetrasi ion klorida yang signifikan, yang ditunjukkan melalui hasil *Rapid Chloride Penetration Test (RCPT)* yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional, sehingga penggunaan ferronickel slag sebagai pengganti agregat halus pada beton memadat sendiri (BMS) dapat menciptakan lingkungan internal beton yang lebih tahan terhadap serangan klorida dan secara efektif menghambat laju korosi baja tulangan, sekaligus meningkatkan durabilitas beton bertulang (Sandra et al., 2025).

Tabel 6. Komposisi kimia slag nikel

Komposisi Kimia	Kandungan (%)
Silikon dioksida (SiO_2)	41,24
Aluminium oksida (Al_2O_3)	9,69
Besi (III) oksida (Fe_2O_3)	1,71
Magnesium oksida (MgO)	19,29
Belerang trioksida (SO_3)	0,90
Kalsium oksida (CaO)	24,71
Natrium oksida (Na_2O)	0,24
Kalium oksida (K_2O)	0,17
Titanium dioksida (TiO_2)	0,26
Mangan (III) oksida (Mn_2O_3)	0,83

Sumber: (Nelfia et al., 2024)

Tabel 7. Hasil pengujian karakteristik slag nikel

No	Parameter	Hasil	Satuan	Spesifikasi Umum	Keterangan
1	Kadar Air	0	%	3,0 – 5,0	Tidak memiliki kandungan air
2	Modulus Kehalusan	3,39	–	2,2 – 3,1	Relatif kasar
3	Berat Isi	1,71	kg/liter	1,4 – 1,9	Memenuhi
4	Berat Jenis Curah	3,1	–	1,6 – 3,2	Memenuhi
5	Penyerapan Air	0,72	%	0,2 – 2,0	Memenuhi

Sumber: (Data primer, diolah penulis (2025))

1.2.2.5 Air

Air merupakan komponen esensial dalam campuran beton yang berfungsi sebagai medium terjadinya reaksi hidrasi antara senyawa-senyawa aktif dalam semen, khususnya trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S), dengan air

sehingga terbentuk produk hidrasi yang berkontribusi terhadap perkembangan kekuatan beton. Selain itu, keberadaan air sangat mempengaruhi sifat beton segar, terutama *workability*, yang menentukan kemampuan beton untuk dicampur, diangkut, dituang, dan dipadatkan secara efektif. Menurut SNI 7656:2012, air yang digunakan harus bersih dan bebas dari bahan-bahan berbahaya yang dapat memengaruhi proses pengerasan dan mutu beton, seperti minyak, asam, garam organik, garam anorganik, lumpur, dan bahan-bahan lain yang bersifat mengganggu. Dengan demikian, pemilihan air yang memenuhi standar SNI sangat penting untuk menjamin kualitas, durabilitas, dan keamanan struktur beton yang dihasilkan.

Air dalam campuran beton memiliki dua fungsi sebagai agen hidrasi, yaitu memicu reaksi kimia untuk membentuk senyawa pengeras dan sebagai pelumas yang menentukan tingkat *workability* pada beton (Li, 2021). Kontrol kuantitas air melalui rasio air semen yang tepat dapat menurunkan porositas beton dengan mengurangi jumlah air bebas, sehingga meningkatkan kekuatan tekan dan menghambat penetrasi zat agresif seperti klorida dan sulfat. Sementara itu, kualitas air campuran harus memenuhi standar bebas kontaminan, karena air yang bersifat asam memiliki pH rendah yang dapat mengganggu proses hidrasi, menurunkan kuat tekan, bahkan mempercepat korosi pada tulangan. Sehingga sebaiknya menggunakan air dengan pH tinggi karena akan menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang lebih baik dibandingkan air asam. Oleh karena itu, pengendalian ketat terhadap jumlah dan sifat kimia air campuran adalah syarat mutlak dalam perancangan dan pengecoran beton berkualitas, sesuai rekomendasi SNI maupun standar internasional, guna memastikan umur struktur yang awet dan risiko kegagalan struktural yang minimal.

1.2.2.6 *Silica Fume*

Menurut ACI 234R-96, *Silica fume* (SF) adalah hasil produksi sampingan dari pemurnian silika dengan batu bara di tanur listrik tinggi dalam pembuatan campuran silikon atau ferro silikon. *Silica fume* merupakan bahan yang sangat halus, bentuk bulat dan berdiameter yang sangat kecil yaitu 1 per 100 kali diameter semen seperti pada tabel 8. *Silica fume* dalam jumlah tertentu dapat menggantikan jumlah semen, selain itu karena *silica fume* mempunyai diameter sangat kecil, maka *silica fume* juga dapat berperan sebagai pengisi diantara partikel-partikel semen. *Silica fume* atau mikrosilika merupakan mineral admixture yang berupa material pozzolan halus yang mengandung SiO_2 yang tinggi, dapat menambah kekuatan beton apabila digunakan dalam beton.

Umumnya *silica fume* dapat dikategorikan sebagai bahan semen tambahan (*admixtures*) yang digunakan dalam beton selain semen *portland*. Menurut *Product Data Sheet* Sikafume®, *silica fume* memiliki beberapa kelebihan jika digunakan dalam pembuatan beton mutu tinggi antara lain:

1. Meningkatkan *workability* untuk jangka waktu yang lama.
2. Meningkatkan stabilitas dan keterpaduan campuran beton segar.
3. Ketahanan beton meningkat drastis.
4. Air resapan pada beton banyak berkurang.

5. Gas di dalam beton banyak berkurang.
6. Peningkatan ketahanan yang besar terhadap karbonasi.
7. Perembesan klorid dalam beton banyak berkurang.
8. Kekuatan awal dan akhir yang tinggi.

Tabel 8. Sifat fisik *silica fume*

Sifat Fisik	Penjelasan
Ukuran Partikel	< 1 μm (1/100 diameter semen)
Warna	Abu-abu gelap
Berat Isi (<i>Bulk Density</i>)	200 – 300 kg/m^3
<i>Specific Gravity</i>	2,2
Kehalusan	15.000 – 30.000 kg/m^2

Sumber: (*Silica fume users manual*)

Penggunaan *silica fume* dalam BMS, ternyata dapat menghambat penetrasi ion klorida yang merupakan salah satu penyebab utama korosi baja tulangan. Penelitian yang dilakukan oleh (Kazemi & Gholampour, 2023) menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* sebagai bahan tambah mineral dalam BMS dapat meningkatkan ketahanan durabilitas material dengan cara memperbaiki mikrostruktur beton. Hal ini terjadi karena sifat fisik *silica fume* yang sangat halus mampu mengisi rongga-rongga mikroskopis dalam pasta semen yang terbentuk setelah reaksi hidrasi, sehingga dapat menghasilkan matriks beton yang rapat dan homogen. Selain itu, kandungan SiO_2 dalam *silica fume* yang tinggi seperti pada tabel 9, berpengaruh pada kapasitas *chloride binding* beton yaitu kemampuan untuk menangkap ion klorida. Hal ini mengurangi jumlah klorida bebas yang mampu mendifusi melalui jaringan kapiler beton menuju tulangan, sehingga memperpanjang waktu inisiasi korosi dan memperlambat perkembangan korosi setelah inisiasi. Uji *rapid chloride permeability test* (RCPT) dan parameter *sorptivity* pada beton yang mengandung *silica fume* menunjukkan resistansi penetrasi klorida yang lebih baik dibandingkan beton tanpa *silica fume*, yang selanjutnya berkontribusi pada pengurangan laju korosi tulangan (Kazemi & Gholampour, 2023).

Tabel 9. Sifat kimiawi *silica fume*

Komposisi Kimia	Kandungan (%)
Silikon dioksida (SiO_2)	Min. 85,0
Besi (III) oksida (Fe_2O_3)	1,4
Aluminium oksida (Al_2O_3)	0,5
Magnesium oksida (MgO)	0,3
Natrium oksida (Na_2O)	0,3
Kalium superoksida (KO_2)	0,7
Kalsium oksida (CaO)	0,5
Hilang Pijar	Maks. 6,0
Kelembaban	Maks. 3,0

Sumber: (ASTM C1240)

1.2.3 Baja Tulangan

Kelemahan utama beton terletak pada kemampuan beton menahan gaya tarik, sehingga diperlukan baja tulangan untuk meningkatkan kemampuan beton menahan beban struktural. Baja tulangan berperan penting dalam menahan gaya tarik yang timbul akibat beban yang bekerja pada balok. Menurut SNI 2052:2024, baja tulangan beton didefinisikan sebagai baja karbon atau baja paduan berbentuk batang berpenampang bundar dengan permukaan polos atau sirip yang digunakan untuk penulangan beton. Baja tulangan dalam konstruksi beton diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu baja tulangan polos (BjTP) dan baja tulangan ulir/sirip (BjTs). Baja tulangan polos adalah baja tulangan beton berpenampang bundar dengan permukaan rata tidak bersirip/ulir. Sedangkan, baja tulangan ulir adalah baja tulangan beton dengan permukaan yang memiliki ulir/sirip melintang dan memanjang yang dimaksudkan untuk meningkatkan daya lekat dan untuk menahan gerakan membujur dari batang secara relatif terhadap beton. Baja tulangan ulir berfungsi untuk meningkatkan kapasitas lekatan antara beton dan baja tulangan, sehingga mampu menyalurkan gaya secara lebih efektif. Baja tulangan ulir merupakan batang baja yang permukaannya diberi deformasi berupa sirip atau pola tertentu, yang dibentuk secara sistematis selama proses produksi guna menghasilkan interaksi mekanis yang optimal dengan beton.

1.2.4 Korosi Baja Tulangan

Daya tahan dari perkuatan beton sebagian besar dikontrol oleh kemampuan beton untuk melindungi baja dari korosi. Perlindungan kimia disediakan oleh beton yang memiliki kadar alkali tinggi dan perlindungan fisik diberikan oleh selimut beton yang bertindak sebagai penghalang akses terhadap material agresif. Meskipun memiliki sifat proteksi, korosi dari baja tulangan telah menjadi penyebab terbesar terjadinya kegagalan pada struktur beton bertulang. Dalam struktur, penetrasi air laut ke dalam beton memungkinkan menjadi penyebab terjadinya karat (Gómez-Luna et al., 2023).

Korosi baja tulangan dalam beton merupakan proses elektrokimia yang melibatkan reaksi antara anoda dan katoda. Pada daerah anoda, besi (Fe) teroksidasi menjadi ion Fe^{2+} dengan melepaskan elektron, sedangkan pada daerah katoda terjadi reaksi reduksi, umumnya melibatkan oksigen dan air. Aliran elektron dari anoda ke katoda melalui baja tulangan, serta aliran ion melalui pori-pori beton sebagai elektrolit, membentuk arus korosi. Proses ini memerlukan keberadaan elektrolit, oksigen, serta jalur konduktif antara anoda dan katoda. Secara alami, beton memiliki kemampuan untuk melindungi baja tulangan melalui mekanisme pasivasi (*passive film*), yaitu proses terbentuknya lapisan film pasif berupa oksida besi pada permukaan baja tulangan akibat lingkungan beton yang bersifat alkalis dengan pH 12,5 sampai 13,5. Lapisan tersebut berfungsi melindungi baja dari reaksi korosi dengan menghambat kontak langsung antara baja, air, dan oksigen. Kondisi ini dipengaruhi oleh senyawa hasil hidrasi semen seperti kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), natrium hidroksida (NaOH), dan kalium hidroksida (KOH) yang menjaga alkalinitas

beton. Selain itu, senyawa seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H) berperan dalam membentuk struktur beton yang padat sehingga mengurangi permeabilitas terhadap air dan ion agresif. Namun, perlindungan ini dapat terganggu oleh masuknya ion klorida (Cl^-) atau akibat karbonasi beton yang menurunkan pH. Ion klorida mampu merusak lapisan pasif pada baja dan memicu terbentuknya titik-titik anodik lokal, sehingga mempercepat proses korosi. Sementara itu, karbonasi menyebabkan penurunan alkalinitas beton sehingga lapisan pelindung baja menjadi tidak stabil.

Resistivitas beton (R_c) merupakan parameter penting yang menggambarkan kemampuan beton dalam menghambat aliran arus listrik sebagai arus korosi (i_{corr}). Nilai resistivitas sangat dipengaruhi oleh porositas, kadar air, serta komposisi material penyusun beton. Beton dengan struktur yang lebih padat dan pori yang lebih kecil akan memiliki resistivitas yang tinggi, sehingga mampu memperlambat pergerakan ion dan menurunkan laju korosi. Dengan demikian, laju korosi berbanding terbalik dengan resistivitas beton atau berbanding lurus dengan konduktivitasnya. Oleh karena itu, peran unsur-unsur dalam beton, seperti senyawa hasil hidrasi semen dan bahan tambahan (misalnya slag nikel), sangat penting dalam meningkatkan kepadatan mikrostruktur, menjaga alkalinitas, serta menghambat penetrasi ion klorida. Hal ini secara langsung berkontribusi dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap mekanisme korosi baja tulangan.

1.2.5 Akselerasi Korosi

Penginduksian korosi pada baja tulangan pada umumnya dilakukan untuk merepresentasikan kondisi degradasi beton yang diakibatkan oleh proses korosi secara terkontrol. Korosi dipercepat dengan cara menerapkan tegangan anodik tetap sebesar 40 V pada tulangan baja. Pendekatan pengujian ini telah banyak diadopsi dalam berbagai studi terdahulu sebagai metode percepatan korosi. Pada pelaksanaannya, tegangan positif konstan diberikan pada tulangan yang tertanam dalam beton, kemudian besarnya arus listrik yang mengalir antara tulangan dan elektroda pembanding dicatat secara periodik guna memantau perkembangan proses korosi. *Direct Current* (DC) power digunakan pada proses akselerasi korosi untuk menyuplai arus konstan 10 Volt ke permukaan tulangan. Positif terminal (+) *power supply* tersambung dengan tulangan dan negatif terminal (-) ke *stainless plate* sebagai pengantar arus ke permukaan tulangan. Media pengujian dilakukan pada plastik kontainer dengan larutan 5% natrium klorida (NaCl).

1.2.6 Pengujian Kuat Lekat (*Pull Out*)

Menurut SNI 03-4809-1998, kuat lekat beton adalah kemampuan interaksi antara beton dan baja tulangan dalam menyalurkan gaya tarik atau tekan melalui mekanisme ikatan di sepanjang permukaan kontak keduanya. Ikatan tersebut terjadi akibat kombinasi adhesi antara pasta semen dan baja, gesekan permukaan, serta penguncian mekanis (*mechanical interlock*), khususnya pada tulangan berulir. Umumnya pengujian kuat lekat beton dapat dilakukan melalui pengujian *pull out*. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kuat lekat tulangan baja ulir diameter 16 dengan BMS. Pengujian dilakukan setelah metode akselerasi korosi beton.

Metode pengujian *pull out* dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Data-data hasil pengujian selanjutnya dilakukan analisis dengan menggunakan persamaan (1) kuat lekat (τ).

$$\tau = \frac{F}{\pi d_b L_d} \dots \dots \dots \text{Persamaan 1}$$

dengan:

- τ : kuat lekat (MPa)
- F : gaya tarik/cabut (N)
- d_b : diameter tulangan (mm)
- L_d : panjang penyaluran (mm)

1.2.7 Penelitian Terdahulu

Rita Irmawaty (2023) dalam jurnal penelitiannya yang berjudul “*Compressive strength and corrosion behavior of steel bars embedded in concrete produced with ferronickel slag aggregate and fly ash: an experimental study*”, mengevaluasi kinerja beton yang menggunakan *ferronickel slag* (FNS) sebagai pengganti pasir alami (*fine aggregate*) dan sebagian semen diganti dengan *fly ash*, termasuk uji korosi akselerasi tulangan baja *embedded*. Metode penelitian berupa eksperimen dengan variasi 50 % FNS serta variasi *fly ash* 15 % dan 30 %, diuji termasuk *accelerated corrosion test* dalam larutan NaCl 3 % menggunakan tegangan 10 V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton dengan FNS dan *fly ash* dapat memproduksi beton yang memiliki ketahanan korosi lebih baik dibanding kontrol, dengan waktu pertama kali retak akibat korosi lebih lambat 1,4 – 2,2 kali, sehingga menunjukkan bahwa slag nikel meningkatkan resistensi terhadap serangan ion klorida yang berperan penting pada laju korosi tulangan baja di dalam beton (Irmawaty et al., 2023).

Syamsul Bahri Ahmad (2022) dengan penelitian yang berjudul “*Performance of Fly Ash Concrete with Nickel Slag Fine Aggregate in the Marine Environment*”, penelitian ini menilai kinerja beton yang menggunakan 50 % nickel slag sebagai agregat halus dipadukan dengan *fly ash* 15 % dan 30 % terhadap durabilitas di lingkungan *marine*. Metode eksperimental melakukan pengujian kuat tekan dan karakteristik durabilitas (misalnya resistensi kenaikan klorida dan porositas) pada umur 28 sampai 180 hari. Hasilnya beton yang mengandung slag nikel menunjukkan peningkatan kuat tekan, serta penurunan porositas dan sorptivitas, yang secara tidak langsung menyiratkan ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi ion klorida, sehingga potensi laju korosi tulangan rendah dibanding beton konvensional dalam lingkungan laut (Ahmad et al., 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh Fitriyanti (2025) tentang “Evaluasi awal penggunaan slag nikel sebagai agregat halus pada Beton *Self-Compacting Concrete* (SCC)”, mengevaluasi substitusi slag nikel sebagai *fine aggregate* pada BMS, dengan variasi kadar substitusi yang diuji terhadap karakteristik beton segar (*slump flow*) dan kuat tekan 7–28 hari. Metode penelitian menggunakan eksperimen

laboratorium yang membandingkan BMS dengan slag nikel terhadap beton kontrol. Hasilnya menunjukkan bahwa slag nikel dengan gradasi No.1 dapat digunakan sebagai pengganti pasir alami pada BMS, menghasilkan kenaikan kuat tekan optimal sekaligus mempertahankan karakteristik BMS. Efek terhadap laju korosi tidak diuji langsung tetapi peningkatan kepadatan matriks beton dapat menurunkan akses ion klorida ke tulangan, yang berkontribusi terhadap ketahanan korosi (Fitriyanti & Ismawati, 2025).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Eristra Ernawan (2023) berjudul “*Mechanical Properties of Concrete Containing Ferronickel Slag as Fine Aggregate Substitute Using Digital Image Correlation Analysis*”, mengevaluasi sifat mekanik, perpindahan (*displacement*), regangan (*strain*), dan *stiffnes* beton yang menggunakan *Ferronickel Slag* (FNS) sebagai substitusi agregat halus dalam beton (0%, 50%, 100%) dengan pendekatan eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan densitas meningkat seiring dengan meningkatnya persentase FNS, Kuat tekan dengan substitusi FNS meningkatkan kuat tekan pada hari ke-28. Persentase FNS-50 menunjukkan performa terbaik secara regangan dan pola retak vertical terkendali dibandingkan persentase FNS-100 yang menunjukkan kombinasi retak kolom dan miring (berbentuk “V”), mengindikasikan kemungkinan tegangan geser lebih tinggi. Sehingga penelitian ini menyimpulkan FNS dapat digunakan secara efektif sebagai pengganti agregat halus dalam beton dan FNS-50 adalah substitusi optimal untuk menghasilkan kekuatan tekan tertinggi, kekakuan terbaik, dan regangan yang terkendali (Ernawan et al., 2023).

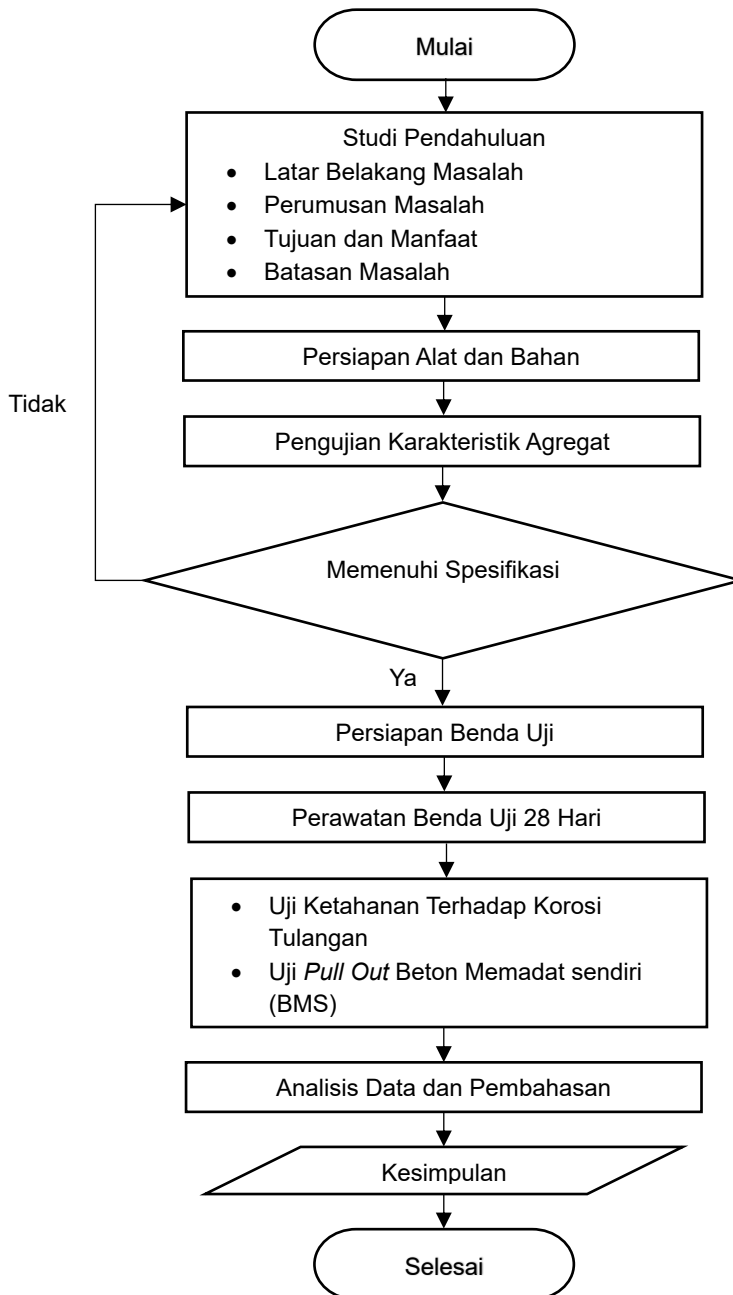
Selanjutnya penelitian Md Nuruzzaman (2024) mengenai “*Performance of Sustainable Green Concrete Incorporating Quarry Dust and Ferronickel Slag as Fine Aggregate*”, meneliti kinerja beton ramah lingkungan dengan mengganti 100% pasir alami menggunakan kombinasi *Quarry Dust* (QD) dan *Ferronickel Slag* (FNS) sebagai agregat halus, untuk mengurangi dampak lingkungan dari penambangan pasir alam. Memberikan hasil penelitian, kombinasi 25% QD + 75% FNS adalah komposisi terbaik sebagai pengganti total pasir alami dalam beton, karena memberikan kinerja mekanik lebih tinggi, *shrinkage* lebih rendah, dan struktur mikro lebih padat. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah industri seperti slag nikel dan debu tambang batu sebagai agregat halus adalah alternatif berkelanjutan dan efisien secara teknis (Nuruzzaman et al., 2024).

Meskipun penelitian yang secara langsung mengukur laju korosi baja tulangan pada BMS dengan slag nikel masih terbatas, studi terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan slag nikel dapat meningkatkan kepadatan dan kuat tekan beton. Hal ini menghasilkan struktur yang lebih rapat sehingga mampu menghambat penetrasi ion klorida sebagai pemicu korosi. Selain itu, kombinasi slag nikel dengan material tambahan seperti *fly ash* juga terbukti meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan agresif. Dengan demikian, karakteristik fisik dan kimia slag nikel berkontribusi positif terhadap durabilitas beton dan berpotensi menurunkan laju korosi baja tulangan.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian

Tahapan pelaksanaan dalam penelitian ini disusun secara sistematis yang dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

2.2 Lokasi Material

Material slag nikel yang digunakan sebagai substitusi agregat halus pada penelitian ini bersumber dari PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia (HNI) yang berlokasi di desa Papanloe, kecamatan Pajukukang, kabupaten Bantaeng.



Gambar 3. Lokasi material slag nikel

2.3 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dengan rentang waktu penelitian selama kurang lebih 6 bulan (Agustus 2025 – Januari 2026), dimulai dengan persiapan sampel, pengujian, pengambilan, dan pengolahan data.

2.4 Jenis Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Untuk mendukung proses analisis, data penelitian ini dikumpulkan melalui dua metode pengumpulan data yaitu;

- 1 Data primer, yakni data yang diperoleh secara langsung melalui proses pemeriksaan dan pengujian sampel di laboratorium, yang kemudian digunakan untuk menganalisis hasil penelitian.
- 2 Data sekunder, yaitu data yang diperoleh melalui berbagai literatur seperti buku, jurnal penelitian, artikel ilmiah, serta standar pengujian yang berlaku di Indonesia, yang digunakan sebagai dasar teori guna memperkuat dan menyempurnakan penelitian ini.

2.5 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun beberapa peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut;

1. *DC Power*, digunakan pada proses akselerasi korosi untuk mensuplai arus konstan 10 Volt ke permukaan tulangan.
2. *Digital Volmeter* (multimeter), digunakan untuk mengukur arus selama proses akselerasi korosi.

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Semen yang digunakan adalah semen jenis PCC.
2. Agregat halus, yaitu pasir dengan ukuran maksimum 4,75 mm atau lolos

- saringan No. 4.
3. Agregat kasar (batu pecah).
 4. Air bersih.
 5. Slag nikel dengan ukuran maksimum 4,75 mm (lolos saringan No. 4) yang berasal dari PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia.
 6. *Silika fume* dengan penggunaan 10% dari berat semen.
 7. Viscocrete 3115N (*superplastizer* untuk meningkatkan *workability* beton).
 8. Besi ulir diameter 16 mm.
 9. Epoxy resin.
 10. Larutan 5% natrium klorida (NaCl).
 11. Larutan asam sitrat 15-20% (digunakan saat pembersihan karat berkerak pada tulangan)

2.6 Komposisi Campuran Beton Memadat Sendiri (BMS)

Campuran BMS terdiri dari empat variasi penambahan slag nikel yaitu 0%, 50%, 70%, dan 100% dan setiap variasi benda uji diberi penandaan khusus yang dapat dilihat pada tabel 10 berikut ini.

Tabel 10. Komposisi campuran BMS

Variasi	W/C	Semen (Kg/m ³)	Air (Kg/m ³)	S/A	Slag Nikel (%)	Pasir (%)	SF (%)	Admixture (%)
SN0	0,30	525,00	175,00	0,53	0	100	10	1,80
SN50	0,30	525,00	175,00	0,53	50	50	10	1,60
SN70	0,30	525,00	175,00	0,53	70	30	10	1,50
SN100	0,30	525,00	175,00	0,53	100	0	10	1,40

Keterangan;

W/C = Faktor air semen

S/A = Rasio pasir terhadap agregat

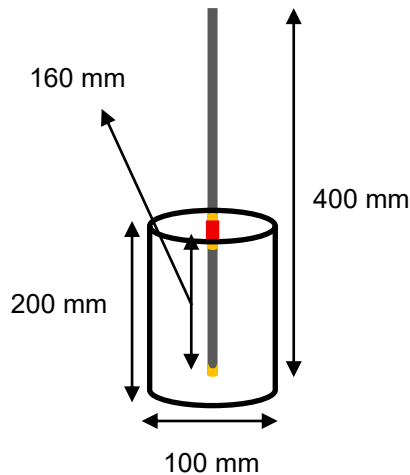
SF = *Silica fume*

Berdasarkan tabel 10, diketahui bahwa benda uji BMS memiliki nilai faktor air semen sebesar 0,30, rasio pasir terhadap agregat sebesar 0,53 dengan masing-masing 10% penambahan *silica fume*. Variasi pertama, SN0 berfungsi sebagai BMS kontrol dengan komposisi agregat halus berupa pasir 100%. Pada variasi SN50, digunakan pasir sebesar 50% dan slag nikel 50% sebagai agregat halus. Variasi SN70, menggunakan campuran pasir sebesar 30% dan slag nikel 70% sebagai agregat halus. Sementara itu, variasi terakhir yaitu SN100 terdiri dari 100% slag nikel sebagai agregat halus.

2.7 Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa benda uji beton bertulang berbentuk silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Tulangan yang digunakan yaitu baja ulir berdiameter 16 mm dengan panjang 400 mm seperti pada gambar 3(a). Total benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah 16

benda uji dengan masing-masing 4 benda uji setiap variasi BMS. Slag nikel yang telah lolos saringan No. 4 digunakan sebagai substitusi agregat halus pada masing-masing variasi BMS. Setelah itu, dilakukan pengecoran menggunakan *concrete mixer* sesuai *mix design* yang telah dibuat. Kemudian dicetak pada cetakan silinder 10×20 cm². Penelitian ini dirancang untuk mengetahui perbandingan nilai laju korosi dengan metode akselerasi. Proses pembuatan benda uji dapat dilihat pada gambar 3(b).



(a)



(b)

Gambar 4. Benda uji (a) Dimensi benda uji (b) Pembuatan benda uji

2.8 Slump Flow

Pengujian *slump flow* dilakukan untuk mengetahui kemampuan alir beton segar tanpa pemadatan. Pengujian diawali dengan membersihkan dan membasahi kerucut Abrams serta pelat dasar. Beton segar kemudian dimasukkan ke dalam kerucut Abrams dalam satu tahap tanpa dilakukan pemadatan atau penusukan. Setelah kerucut terisi penuh, cetakan diangkat secara vertikal dan perlahan sehingga beton mengalir dan menyebar di atas pelat datar akibat beratnya sendiri. Diameter sebaran beton diukur pada dua arah yang saling tegak lurus, kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh nilai *slump flow* dengan nilai acuan berkisar antara 550 – 850 mm berdasarkan EFNARCH. Selama pengujian, dilakukan pengamatan visual

untuk memastikan tidak terjadi segregasi atau *bleeding* pada beton segar. Pengujian *slump flow* dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 5. Pengujian *slump flow*

2.9 Perawatan Benda Uji

Setelah pengecoran dan benda uji mencapai *initial setting*, benda uji dilepaskan dari cetakan. Selanjutnya, dilakukan perawatan beton dengan metode perawatan *water curing*, yaitu benda uji direndam menggunakan air tawar di dalam bak perendam sesuai umur pengujian. Metode *water curing* ini bertujuan untuk meminimalkan penyusutan dini, meningkatkan perkembangan kuat tekan, serta memperbaiki durabilitas beton memadat sendiri. *Water curing* dilakukan selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian akselerasi korosi. Proses *curing* dapat dilihat pada gambar 5.

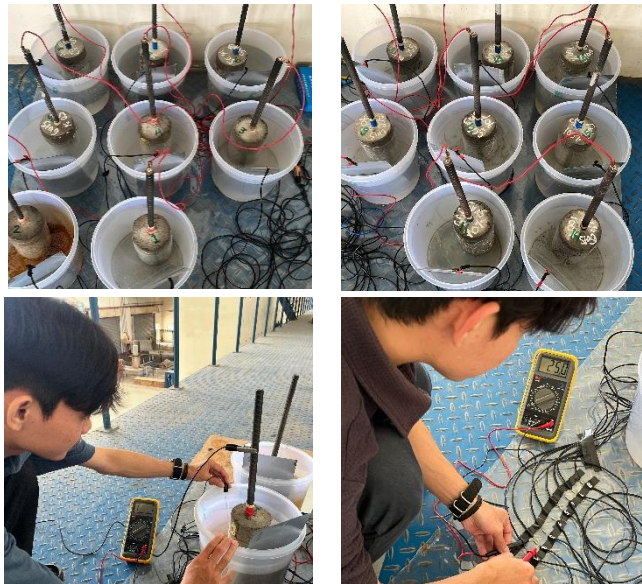


Gambar 6. Proses *curing* benda uji

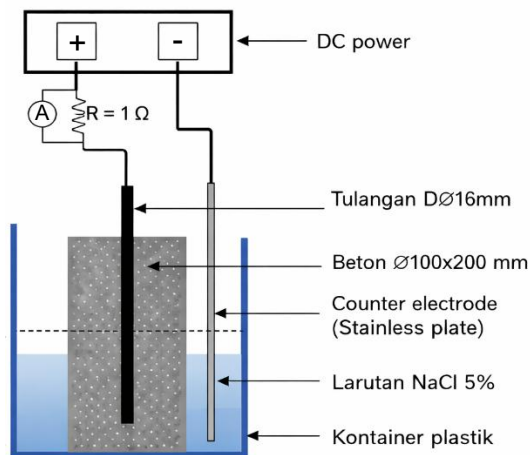
2.10 Pengujian Akselerasi Korosi

Pengujian akselerasi korosi dilakukan setelah proses *water curing* beton selama 28 hari pada gambar 7. Setengah dari tinggi benda uji (100 mm) direndam di dalam kontainer plastik yang berisi larutan NaCl 5%. DC Power (*Direct Current Power*) menyuplai arus sebesar 10 V ke permukaan tulangan, positif terminal (+) *power supply* tersambung dengan tulangan dan negatif terminal (-) ke *stainless plate* sebagai pengantar arus ke permukaan tulangan. Pembacaan arus korosi pada jam 09.00, 12.00, dan 15.00 setiap hari secara rutin selama proses akselerasi dengan menggunakan *Digital Volt Meter* dapat dilihat pada gambar 6. Karena adanya peningkatan produk korosi selama proses akselerasi akan mengakibatkan retak pada beton, maka retak pada beton akan diidentifikasi, yaitu pola retak dan lebar

retak setelah proses akselerasi korosi. Proses akselerasi dihentikan setelah pembacaan arus korosi menurun secara signifikan serta terjadi retak pada beton.



Gambar 7. Proses akselerasi korosi



Gambar 8. Skema akselerasi korosi

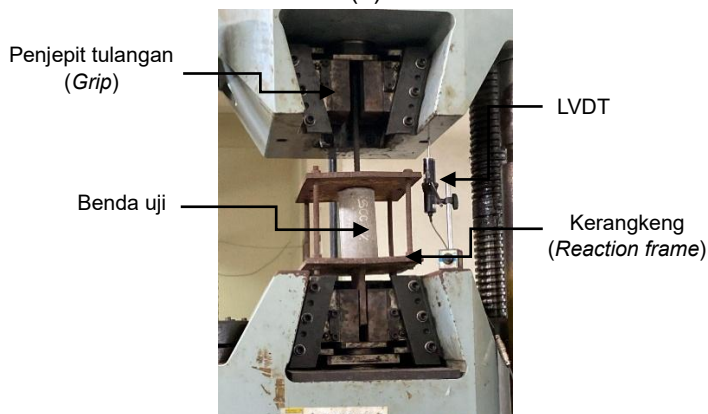
2.11 Pengujian Kuat Lekat

Pengujian kuat lekat dilakukan dengan metode *pull out* setelah proses akselerasi korosi selesai pada gambar 8(a). Pengujian dilakukan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) yang memberikan gaya tarik secara bertahap pada tulangan hingga terjadi slip atau terlepas dari beton. Seiring bertambahnya beban tarik, tulangan akan mulai mengalami pergeseran relatif terhadap beton (*bond slip*). Pergerakan inilah yang diukur oleh *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT).

Dalam penelitian ini, benda uji tidak menggunakan tulangan spiral atau tulangan pengekan tambahan, sehingga kegagalan yang terjadi merepresentasikan ikatan langsung antara tulangan dan beton tanpa adanya pengaruh pengekan dari tulangan tambahan. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kemampuan ikatan antara tulangan baja dan beton.



(a)



(b)

Gambar 9. Kuat lekat (a) Pengujian kuat lekat (b) Skema pengujian *pull out*

Prosedur pengujian kuat lekat pada gambar 8(b) mengacu pada ASTM C234 dan SNI 03-4809-1998 sebagai berikut:

1. Siapkan benda uji yang telah melalui proses akselerasi korosi.
2. Mesin UTM disiapkan dan dikalibrasi, serta memasang rangka reaksi (*reaction frame*) pada benda uji untuk menahan benda uji beton selama proses penarikan tulangan.
3. Benda uji ditempatkan pada rangka reaksi di dalam UTM sehingga beton tertahan, sementara ujung tulangan dijepit oleh *grip* mesin UTM.
4. LVDT dipasang pada sisi benda uji untuk mengukur perpindahan atau slip tulangan terhadap beton selama proses penarikan.
5. Mesin UTM memberikan gaya tarik secara bertahap dan kontinu pada tulangan hingga terjadi slip yang signifikan atau tulangan terlepas dari beton.
6. Beban tarik maksimum yang tercatat pada UTM dan nilai slip dari LVDT dicatat sebagai data untuk menghitung kuat lekat antara tulangan dan beton.

2.12 Estimasi Kehilangan Massa Berdasarkan Hukum Faraday

Estimasi kehilangan massa baja tulangan akibat proses korosi pada penelitian ini dihitung secara teoritis menggunakan Hukum Faraday. Pendekatan ini digunakan untuk memperkirakan jumlah massa logam yang terlarut selama proses akselerasi korosi berdasarkan besarnya arus listrik yang mengalir pada sistem pengujian. Hukum Faraday menyatakan bahwa jumlah zat yang mengalami reaksi elektrokimia pada elektroda sebanding dengan muatan listrik yang mengalir melalui larutan elektrolit. Dengan kata lain, semakin besar arus listrik dan semakin lama waktu pengaliran arus, maka massa logam yang teroksidasi atau mengalami korosi juga akan semakin besar. Dalam penelitian ini, proses akselerasi korosi dilakukan dengan mengalirkan arus listrik searah *Direct Current* (DC) pada benda uji beton bertulang yang sebagian direndam dalam larutan natrium klorida (NaCl). Baja tulangan berfungsi sebagai anoda sehingga mengalami reaksi oksidasi dan kehilangan massa selama proses pengujian berlangsung. Untuk menghitung kehilangan massa (W), digunakan persamaan:

$$W = \frac{AIt}{nF} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2}$$

dengan:

W : Massa logam yang hilang (gram)
 A : Berat atom besi ($\text{Fe} = 55,85 \text{ gram/mol}$)
 It : Total muatan listrik (Q) (mA atau Coloumb)
 n : Valensi logam besi (untuk korosi Fe, $n = 2$)
 F : Konstanta Faraday ($96,485 \text{ C/mol}$)

Selanjutnya, dilakukan perhitungan laju korosi/*corrosion rate* (CR) yang biasanya dihitung berdasarkan kehilangan massa baja tulangan setelah proses pengujian akselerasi korosi. Kehilangan massa tersebut menunjukkan jumlah logam yang telah teroksidasi dan terlepas dari permukaan baja selama periode pengujian. Semakin besar kehilangan massa yang terjadi, maka semakin tinggi nilai laju korosi yang dialami oleh tulangan. Perhitungan laju korosi (CR) berdasarkan ASTM G1 dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{CR} = \frac{KW}{\rho AT} \dots\dots\dots \text{Persamaan 3}$$

dengan:

CR : Laju korosi (mm/tahun)
 K : Konstanta konversi ($8,76 \times 10^4$)
 W : Massa logam yang hilang (gram)
 ρ : Densitas besi/baja ($7,85 \text{ gram/cm}^3$)

A : Luas penampang/permukaan terpapar ($200,96 \text{ mm}^2 = 2,0096 \text{ cm}^2$)

T : Waktu pengujian dalam jam

2.13 Estimasi Kehilangan Berat Tulangan Hasil Penelitian

Estimasi kehilangan berat tulangan pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya massa baja tulangan yang hilang akibat proses korosi selama pengujian akselerasi korosi. Perhitungan kehilangan berat ini diperoleh dari selisih antara berat awal tulangan sebelum proses korosi dan berat akhir tulangan setelah proses korosi serta pembersihan produk karat. Sebelum dilakukan proses akselerasi korosi, baja tulangan terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran yang menempel pada permukaannya dan kemudian ditimbang untuk memperoleh berat awal. Setelah proses pengujian akselerasi korosi selesai, tulangan dikeluarkan dari benda uji beton dan dibersihkan dari produk korosi menggunakan asam sitrat dengan konsentrasi 15 – 20% selama 2 – 4 jam hingga permukaan baja kembali terlihat bersih. Selanjutnya, tulangan dikeringkan dan ditimbang kembali untuk mendapatkan berat akhir. Besarnya kehilangan berat tulangan dihitung dengan menggunakan persamaan 4 sebagai berikut:

$$W = W_0 - W_1 \dots\dots\dots \text{Persamaan 4}$$

dengan:

W : Kehilangan berat tulangan (gram)

W_0 : Berat awal tulangan sebelum korosi (gram)

W_1 : Berat akhir tulangan setelah korosi (gram)