

**DISERTASI**

**KINERJA BETON YANG MENGANDUNG FLY ASH DAN  
BUTIRAN SLAG NIKEL PENGGANTI AGREGAT HALUS DI  
LINGKUNGAN AIR LAUT**

*Perfomance of Concrete Containing Fly Ash and Nickel Slag  
Grounds as a Replacement of Fine Aggregates in Sea Water  
Environment*

**SYAMSUL BAHRI AHMAD  
D013181013**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**DISERTASI**

**KINERJA BETON YANG MENGANDUNG FLY ASH DAN  
BUTIRAN SLAG NIKEL PENGGANTI AGREGAT HALUS DI  
LINGKUNGAN AIR LAUT**

*Perfomance of Concrete Containing Fly Ash and Nickel Slag  
Grounds as a Replacement of Fine Aggregates in Sea Water  
Environment*

**SYAMSUL BAHRI AHMAD  
D013181013**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**PENGAJUAN DISERTASI**

**KINERJA BETON MENGANDUNG FLY ASH DAN BUTIRAN  
SLAG NIKEL PENGGANTI AGREGAT HALUS DI  
LINGKUNGAN AIR LAUT**

Disertasi  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor  
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh



**SYAMSUL BAHRI AHMAD**

**D013181013**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

## DISERTASI

# KINERJA BETON YANG MENGANDUNG FLY ASH DAN BUTIRAN SLAG NIKEL PENGGANTI AGREGAT HALUS DI LINGKUNGAN AIR LAUT

**SYAMSUL BAHRI AHMAD**  
**NIM D013181013**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin tanggal 25 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,  
Promotor



Dr.Eng.Ir.Rita Irmawaty, ST.,MT  
NIP.19720619 200012 2 001

Co-Promotor



Prof.Dr.Ir.Sumarni Hamid Aly, MT  
NIP.19581228 1986 01 2001

Co-Promotor



Dr.Eng.Ir.A.Arwin Amiruddin, ST.,MT  
NIP.19791226 200050 11 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof.Dr.Eng.Ir.Muhammad Isran Ramli,  
ST.MT.,IPM.,ASEAN.Eng.  
NIP.19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi S3  
Teknik Sipil



Dr.Eng.Ir.Rita Irmawaty, ST.,MT  
NIP.19720619 200012 2 001

## **PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Syamsul Bahri Ahmad  
Nomor mahasiswa : D013181013  
Program studi : Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “KINERJA BETON YANG MENGANDUNG FLY ASH DAN BUTIRAN SLAG NIKEL PENGGANTI AGREGAT HALUS DI LINGKUNGAN AIR LAUT” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr.Eng.Ir.Hj.Rita Irmawaty, ST.,MT sebagai Promotor, Prof.Dr.Ir.Hj.Sumarni Hamid Aly, MT dan Dr.Eng.Ir.A.Arwin Amiruddin, ST.,MT sebagai co-promotor-1 dan co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (Seminar Nasional Teknik Sipil X Universitas Muhammadiyah Surakarta, Halaman : 23-30, ISSN : 2459-9727) dengan judul artikel “PERILAKU MEKANIK BETON YANG MENGANDUNG FLY ASH DAN SLAG NIKEL PENGGANTI AGREGAT HALUS” dan di Jurnal Internasional (Civil Engineering Journal, Volume : 8 No.12 Desember 2022, Halaman : 3803-3815, ISSN 2676-6957) dengan judul artikel “PERFORMANCE of FLY ASH CONCRETE with NICKEL SLAG FINE AGGREGATE in THE MARINE ENVIRONMENT”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 25 Januari 2023

Yang menyatakan



  
Syamsul Bahri Ahmad

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami kehadirat Allah SWT atas izinnya sehingga penelitian dan penulisan disertasi dengan judul ***“Kinerja Beton Yang Mengandung Fly Ash dan Butiran Slag Nikel Sebagai Pengganti Agregat Halus Di Lingkungan Air Laut”*** dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan disertasi ini, kami banyak mendapat bimbingan dan arahan dari promotor, co-promotor dan dukungan dari pelbagai pihak.

Kami menyampaikan penghargaan yang sangat tinggi dan ucapan terima kasih yang mendalam kepada Ibu **Dr.Eng.Ir.Hj.Rita Irmawaty, ST., MT**, sebagai Promotor atas bimbingan, arahan dan petunjuknya sehingga penelitian dan penyusunan disertasi ini dapat kami selesaikan dengan baik. Ucapan dan penghargaan yang sama kami sampaikan kepada ibu **Prof.Dr.Ir.Hj. Sumarni Hamid Aly, M.T.**, dan bapak **Dr. Eng.Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Co-Promotor yang telah banyak memberikan waktu, arahan dan bimbingannya kepada kami .

Selain itu, kami juga menyampaikan penghargaan yang setinggi tingginya kepada bapak **Prof. Dr. H. Jamaluddin Jompa, M.Sc** (Rektor Universitas Hasanuddin), **Prof.dr. Budu, Ph.D,Sp.M (K).**, **M.Med.Ed.** (Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin), bapak **Prof.Dr.Eng.Ir.H.Isran Ramli, S.T.,M.T.**, (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), ibu **Dr.Eng.Ir.Hj.Rita Irmawaty, S.T., M.T.**, (**Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin**), bapak **Prof. Dr. Ir. H.M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng.** (Ketua Departemen

Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin) atas dukungan dan motivasi yang telah diberikan kepada segenap mahasiswa/i. Begitu juga kepada bapak Dr.Eng.Akbar Caronge yang telah membantu dalam pengujian di laboratorium dan Dr.Eng.Fakhrudin dalam pembuatan jurnal Internasional. Kemudian penghargaan yang sama kepada dan bapak/ibu dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/ibu staf Pascasarjana Unhas khususnya staf Prodi S3 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi, kami juga menyampaikan banyak terima kasih.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga dan doa yang tulus khususnya kepada kedua orang tua kami H.Ahmad Tabua (alm) dan St.Nur Abdullah (almh) dan kedua mertua H.Indo Rina (almh), Petta Wakka (alm). Begitu juga kepada keluarga kecilku tercinta istriku Ratnawati SE yang sungguh banyak memberi dukungan yang tak ternilai, semangat dan do'a yang tulus, anak-anakku tercinta Muhammad Muflih Syam, Nurul Fitrah Mujahidah, Nurul Inda Sidrah dan Muhammad Asyraf Athaillah Syam yang telah menjadi penyemangatku. Kakanda Prof.Dr.H.Muhammad Arifin Ahmad MA dan istri Hj.Haniah Hamid M.Pd (Almh) beserta keluarga atas segala do'a, motivasi dan dukungan, adik-adikku tercinta St.Zahrah Ahmad S.Ag., St.Rukayah Ahmad, Muhammad Zaki Ahmad S.T. Muhammad Mimsyad S.T.,M.Eng.,Ph.D atas segala do'a dan dukungan yang tak ternilai. Juga kepada terkhusus anakda Dr.Ridwan Banda ST.MT sebagai wakil PT Vale dan istri Nur Afni Indahari Arifin S.Psi.,M.Psi atas do'a dan bantuannya yang tak ternilai, keluarga dari istri



dan ponakan-ponakan tercinta, semua pihak atas segala keikhlasan, pikiran dan motivasi. Special kepada rekan-rekan seperjuangan program doktor teknik sipil angkatan 2018 yang senantiasa bahu membahu saling mensupport sehingga semua permasalahan yang dihadapi dapat dilewati dengan baik. Hanya dengan doa semoga Allah SWT memberi pahala yang berlipat ganda. Aamiin yaa Rabbal Alamin.

Makassar, Januari 2023

Syamsul Bahri Ahmad

## ABSTRAK

**SYAMSUL BAHRI AHMAD.** *Kinerja Beton yang Mengandung Fly Ash dan Butiran Slag Nikel Pengganti Agregat Halus di Lingkungan Air Laut.* (dibimbing oleh Rita Irmawaty, Sumarni Hamid Aly dan A. Arwin Amiruddin).

Pemanfaatan limbah industri *fly ash* dan *slag* nikel dalam produksi beton merupakan salah satu upaya untuk mengurangi dampak kerusakan lingkungan dari produksi semen dan pemanfaatan produk sampingan untuk mengurangi limbah industri. Tujuan penelitian ini adalah menemukan kelayakan kekuatan mekanik dan ketahanan beton yang mengandung *slag* nikel 50%, *fly ash* 15% dan 30% pada rasio air-semen 0,25 dan 0,45 di lingkungan air laut. Penelitian ini bersifat kajian eksperimental berupa pengujian sampel silinder beton yang mengandung *slag* nikel 50 %, dan kombinasi dengan *fly ash* 15 % dan 30 % dengan diameter (100±5) mm dan tinggi (200±5) mm dengan mengacu pada standar yang berlaku untuk mengkaji kinerja beton berupa kekuatan mekanik yaitu kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas beton serta potensi ketahanan beton yaitu sorptiviti, porositas, migrasi ion klorida dan laju korosi tulangan dengan rasio air-semen 0,25 dan 0,45 di lingkungan air laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan mekanik dan ketahanan beton lebih baik dari beton kontrol dengan menggunakan *slag* nikel 50% pada rasio air semen 0,25 dan 0,45 meskipun beton pada rasio air semen 0.45 tidak memenuhi syarat untuk lingkungan air laut zone C2 karena syarat minimal  $f'c$  35 Mpa tidak terpenuhi. Penambahan *fly ash* 15% dan 30% mengganti semen, berkontribusi pada peningkatan kinerja mekanik. Namun terjadi penurunan kuat tekan pada persentase *fly ash* 30% dengan rasio air semen 0,45. Sedangkan pada rasio air semen 0,25, penambahan *fly ash* dapat ditingkatkan hingga 30% untuk mendapatkan kekuatan mekanik dan ketahanan beton yang lebih baik dan layak diaplikasikan pada zona C2 (beton terpapar dalam kelembaban dan lingkungan garam ektsternal secara terus menerus) baik pada daerah pasang surut / *tidal zone* maupun daerah percikan / *spray zone* berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 19.3

Kata kunci : *slag* nikel, *fly ash*, kekuatan mekanik, ketahanan beton

## ABSTRACT

**SYAMSUL BAHRI AHMAD.** *Concrete Performance Containing Fly Ash and Nickel Slag Grains Substitute Fine Aggregate in The Sea Water environment.* (supervised by Rita Irmawaty, Sumarni Hamid Aly and A. Arwin Amiruddin).

Utilization of fly ash and nickel slag industrial waste in concrete production is one of the efforts to reduce the impact of environmental damage from cement production and the use of by-products to reduce industrial waste. The purpose of this research was to determine the feasibility of mechanical strength and durability of concrete containing 50% nickel slag, 15% fly ash and 30% at a water-cement ratio of 0.25 and 0.45 in a seawater environment. This research is an experimental study in the form of testing concrete cylinder samples containing 50% nickel slag, and a combination with 15% and 30% fly ash with a diameter ( $100 \pm 5$ ) mm and a height ( $200 \pm 5$ ) mm with reference to the applicable standards for studied the performance of concrete in the form of mechanical strength, i.e. compressive strength, split tensile strength and modulus of elasticity of concrete as well as the potential resistance of concrete, i.e. sorptivity, porosity, migration of chloride ions and corrosion rate of reinforcement with a water-cement ratio of 0.25 and 0.45 in a seawater environment. The results showed that the mechanical strength and durability of the concrete were better than the control concrete by using 50% nickel slag at a water-cement ratio of 0.25 and 0.45, although concrete at a water-cement ratio of 0.45 did not meet the requirements for a seawater zone C2 environment due to minimum requirements.  $f'c$  35 MPa is not fulfilled. The addition of 15% and 30% fly ash replaces cement, contributing to an increase in mechanical performance. However, there was a decrease in compressive strength at the percentage of 30% fly ash with a water-cement ratio of 0.45. Whereas at a water-to-cement ratio of 0.25, the addition of fly ash can be increased up to 30% to obtain better mechanical strength and concrete durability and is feasible to be applied in zone C2 (concrete is continuously exposed to humidity and external salt environments) both in tidal areas receding tidal zone and spray zone based on SNI 2847-2019 article 19.3.

Keywords: nickel slag, fly ash, mechanical strength, concrete resistance

**DAFTAR ISI**

	halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGAJUAN .....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI .....	iv
KATA PENGANTAR .....	vi
ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT .....	x
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....	xx
BAB I PENDAHULUAN .....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	7
C. Tujuan Penelitian .....	8
D. Batasan Masalah .....	8
E. Manfaat Penelitian .....	10

F. Sistematika Penulisan .....	10
G. Kebaruan / Novelty .....	12
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	13
A. Hasil Studi Empirik Penelitian Terdahulu .....	13
B. Material Pembentuk Beton .....	16
C. Kuat Tekan beton .....	22
D. Kuat Tarik Beton .....	23
E. Tegangan - Regangan Beton .....	24
F. Tingkat Penyerapan Air ( <i>Sorptivity</i> ) Beton .....	26
G. Porositas Beton .....	27
H. Migrasi Ion Klorida .....	28
I. Laju Korosi Tulangan .....	31
J. Kerangka Pikir Penelitian .....	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	36
A. Waktu dan Lokasi Penelitian .....	36
B. Teknik Pengumpulan Data .....	36
C. Rancangan Pengujian .....	37
D. Bagan Alir Penelitian .....	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	52
A. Karakteristik Material .....	52
B. Kekuatan Mekanik Beton .....	57

C. Karakteristik Durabilitas Beton .....	69
D. Hubungan Kekuatan Mekanik Dengan Durabilitas Beton .....	95
E. Temuan Empirik .....	98
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	101
A. Kesimpulan .....	101
B. Saran .....	102
DAFTAR PUSTAKA .....	103
DAFTAR LAMPIRAN .....	104

## DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
<b>Tabel 1.</b>	Kandungan senyawa kimia fly ash ( <i>ASTM C618-03</i> ) .....	18
<b>Tabel 2.</b>	Penetrasi ion klorida berdasarkan nilai coulombs ( <i>ASTMC1202- 97</i> ) .....	30
<b>Tabel 3.</b>	Kriteria ketahanan penetrasi beton berdasarkan koefisien migrasi klorida ( <i>ASTM C1202-97</i> ) .....	30
<b>Tabel 4.</b>	Standar uji karakteristik bahan .....	37
<b>Tabel 5.</b>	Komposisi Campuran Beton untuk 1 m <sup>3</sup> dengan fas. 0.45 .....	39
<b>Tabel 6.</b>	Komposisi campuran beton untuk 1 m <sup>3</sup> dengan fas 0.25 .....	39
<b>Tabel 7.</b>	Jumlah sampel benda uji setiap jenis pengujian beton .....	40
<b>Tabel 8.</b>	Jenis pengujian dan standar pengujian .....	41
<b>Tabel 9.</b>	Jadwal waktu dan toleransi pengujian .....	44
<b>Tabel 10.</b>	Karakteristik fisik agregat pasir sungai, slag nikel, batu pecah dan semen .....	53
<b>Tabel 11.</b>	Komposisi kimia <i>fly ash</i> dan <i>slag</i> nikel (quality control PLTU punagaya) dan (Ridwan B, 2018). .....	56
<b>Tabel 12.</b>	Kuat tekan beton .....	60
<b>Tabel 13.</b>	Modulus elastisitas beton .....	64
<b>Tabel 14.</b>	Kuat tarik belah beton .....	67

<b>Tabel 15.</b>	Tingkat penyerapan permukaan ( <i>sorptivity</i> )- awal beton.....	73
<b>Tabel 16.</b>	Tingkat penyerapan permukaan ( <i>sorptivity</i> )-akhir beton.....	74
<b>Tabel 17.</b>	Tahanan penetrasi klorida beton Q (coulombs) .....	82
<b>Tabel 18.</b>	Kategori tahanan penetrasi klorida .....	83
<b>Tabel 19.</b>	Kedalaman penetrasi klorida beton .....	85
<b>Tabel 20.</b>	Nilai arus korosi $I_{corr}$ dan waktu pada faktor air semen 0,45 ...	88
<b>Tabel 21.</b>	Nilai arus korosi $I_{corr}$ dan waktu pada faktor air semen 0,25 ...	92



## DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
<b>Gambar 1.</b>	Reaksi <i>fozzolanic</i> bahan tambah <i>fly ash</i>	17
<b>Gambar 2.</b>	Set up pengujian migrasi ion klorida metode ASTM C1202	28
<b>Gambar 3.</b>	Set up pengujian migrasi ion klorida metode ND testBuild 492	29
<b>Gambar 4.</b>	Set up pengujian korosi tulangan	33
<b>Gambar 5.</b>	Kerangka pikir penelitian	34
<b>Gambar 6.</b>	Set up pengujian sorptiviti beton	44
<b>Gambar 7.</b>	Zone pengukuran kedalaman penetrasi klorida	48
<b>Gambar 8.</b>	Benda uji dalam cetakan (a) dan perawatan air tawar (b)	49
<b>Gambar 9.</b>	Set up pengujian akselerasi laju korosi	50
<b>Gambar 10.</b>	Diagram alir penelitian	51
<b>Gambar 11.</b>	Gradasi pasir sungai dalam zone 3	54
<b>Gambar 12.</b>	Gradasi slag nikel	54
<b>Gambar 13.</b>	Gradasi gabungan agregat ukuran maksimum 20 mm	55
<b>Gambar 14.</b>	Pembuatan benda uji	57
<b>Gambar 15.</b>	Pengujian <i>slump</i> beton segar	58
<b>Gambar 16.</b>	Nilai <i>slump</i> beton	59
<b>Gambar 17.</b>	(a) Pengujian kuat tekan beton, (b) model kegagalan beton	61
<b>Gambar 18.</b>	Hubungan kuat tekan dengan umur beton	62
<b>Gambar 19.</b>	Uji modulus elastisitas beton	63
<b>Gambar 20.</b>	Modulus elastisitas beton	64

<b>Gambar 21.</b>	(a) Uji kuat tarik beton, (b) model retak benda uji	68
<b>Gambar 22.</b>	Uji sorptiviti beton	71
<b>Gambar 23.</b>	Hubungan I dengan waktu umur 28 hari pada rasio w/c 0,25	72
<b>Gambar 24.</b>	Hubungan I dengan waktu umur 180 hari pada rasio w/c 0,25	72
<b>Gambar 25.</b>	Hubungan I dengan waktu umur 28 hari pada rasio w/c 0,45	72
<b>Gambar 26.</b>	Hubungan I dengan waktu umur 180 hari pada rasio w/c 0,45	73
<b>Gambar 27.</b>	Tingkat penyerapan permukaan ( <i>sorptivity</i> )- awal ( $10^{-2}.mm/\sqrt{t}$ )	74
<b>Gambar 28.</b>	Uji porositas beton	77
<b>Gambar 29.</b>	Porositas beton pada faktor air semen 0,25 dan 0,45	78
<b>Gambar 30.</b>	Hubungan porositas dengan sorptiviti beton	79
<b>Gambar 31.</b>	Pengujian akselerasi migrasi ion klorida metode ND test 492	81
<b>Gambar 32.</b>	Kedalaman penetrasi klorida (warna putih perak)	84
<b>Gambar 33.</b>	Uji laju korosi tulangan	89
<b>Gambar 34.</b>	Hubungan arus korosi dengan waktu pada faktor air semen 0,45	89
<b>Gambar 35.</b>	Retak pada variasi beton (a) OPC-pasir, (b) OPC-50GNS, (c)15FA-50GNS dan (d) 30FA-50GNS	91
<b>Gambar 36</b>	Hubungan arus listrik dengan waktu pada rasio air semen 0,25	90
<b>Gambar 37.</b>	(a) OPC-pasir, (b) OPC-50GNS, (c) 15FA-50GNS, (d) 30FA -50GNS	94
<b>Gambar 38.</b>	Hubungan Y1 dengan X1 dan X2 pada beton OPC-pasir	97
<b>Gambar 39.</b>	Hubungan Y1 dengan X1 dan X2 pada beton OPC - 50GNS	97
<b>Gambar 40.</b>	Hubungan Y1 dengan X1 dan X2 pada beton 15FA - 50GNS	97
<b>Gambar 41.</b>	Hubungan Y1 dengan X1 dan X2 pada beton 30FA – 50GNS	98

**DAFTAR LAMPIRAN**

Nomor	Halaman
<b>Lampiran 1.</b> Campuran beton 1m <sup>3</sup> 100% pasir pada fas. 0.45	112
<b>Lampiran 2.</b> Campuran beton 1m <sup>3</sup> 50 % slag nikel pada fas. 0.45	113
<b>Lampiran 3.</b> Campuran beton 1m <sup>3</sup> 100% pasir pada fas. 0.25	114
<b>Lampiran 4.</b> Campuran beton 1m <sup>3</sup> 50 % slag nikel pada fas. 0.25	115
<b>Lampiran 5.</b> Kuat tekan beton OPC-pasir pada fas. 0,45	116
<b>Lampiran 6.</b> Kuat tekan beton OPC-50GNS pada fas. 0,45	117
<b>Lampiran 7.</b> Kuat tekan beton 15FA-50GNS pada fas. 0,45	118
<b>Lampiran 8.</b> Kuat tekan beton 30FA-50GNS pada fas. 0,45	119
<b>Lampiran 9.</b> Kuat tekan beton OPC-pasir pada fas. 0,25	120
<b>Lampiran 10.</b> Kuat tekan beton OPC-50GNS pada fas. 0,25	121
<b>Lampiran 11.</b> Kuat tekan beton 15FA-50GNS pada fas. 0,25	122
<b>Lampiran 12.</b> Kuat tekan beton 30FA-50GNS pada fas. 0,25	123
<b>Lampiran 13.</b> Penyerapan (sorptivity) beton OPC-pasir pada fas. 0,45	124
<b>Lampiran 14.</b> Penyerapan (sorptivity) beton OPC-50GNS pada fas. 0,45	125
<b>Lampiran 15.</b> Kuat tekan beton 15FA-50GNS pada fas. 0,45	126
<b>Lampiran 16.</b> Kuat tekan beton 30FA-50GNS pada fas. 0,45	127
<b>Lampiran 17.</b> Penyerapan (sorptivity) beton OPC-pasir pada fas. 0,25	128
<b>Lampiran 18.</b> Penyerapan (sorptivity) beton OPC-50GNS pada fas. 0,25	129

<b>Lampiran 19.</b> Penyerapan (sorptivity) beton 15FA-50GNS pada fas. 0,25	130
<b>Lampiran 20.</b> Penyerapan (sorptivity) beton 30FA-50GNS pada fas. 0,25	131
<b>Lampiran 21.</b> Porositas beton OPC-pasir pada fas.0,45 umur 28 hari	132
<b>Lampiran 22.</b> Porositas beton OPC-50GNS pada fas.0,45 umur 28 hari	133
<b>Lampiran 23.</b> Porositas beton 15FA-50GNS pada fas.0,45 umur 28 hari	133
<b>Lampiran 24.</b> Porositas beton 30FA-50GNS pada fas.0,45 umur 28 hari	133
<b>Lampiran 25.</b> Porositas beton OPC-pasir pada fas.0,25 umur 28 hari	134
<b>Lampiran 26.</b> Porositas beton OPC-50GNS pada fas.0,25 umur 28 hari	134
<b>Lampiran 27.</b> Porositas beton 15FA-50GNS pada fas.0,25 umur 28 hari	135
<b>Lampiran 28.</b> Porositas beton 30FA-50GNS pada fas.0,25 umur 28 hari	135
<b>Lampiran 29.</b> Penetrasi klorida beton OPC-pasir fas.0,25 dan 28 hari	136
<b>Lampiran 30.</b> Penetrasi klorida beton OPC-50GNS fas.0,25 dan 28 hari	136
<b>Lampiran 31.</b> Penetrasi klorida beton 15FA-50GNS fas.0,25 dan 28 hari	137
<b>Lampiran 32.</b> Penetrasi klorida beton 30FA-50GNS fas.0,25 dan 28 hari	138

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang / singkatan	Arti dan keterangan
A	= Luas penampang beton
ASTM	= American Society for Testing And Material
AASHTO	= American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	= American Concrete Institute
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= Aluminium oxide
ASR	= Alkali-Silika-Reaction
B	= Konstanta Stern-Geary
B3	= Bahan Berbahaya dan Beracun
BFS	= Blast Furnace Slag
BPPI	= Badan Penelitian dan Pengembangan Industri
BS	= British Standard
CO <sub>2</sub>	= Karbon Dioksida
CaO	= Kapur/Batu Kapur
Ca(OH) <sub>2</sub>	= Calcium hydroxide
Cl/Cl <sub>2</sub>	= Klorida/Klorin
CSH	= Calcium silicate hydrate/tobermorite
CH	= Calcium hydroxide/portlandite
C <sub>2</sub> S	= Dicalcium silicate/Belite
C <sub>3</sub> S	= Tricalcium silicate/alite
C <sub>3</sub> A	= Tricalcium Aluminate/aluminate
C <sub>4</sub> AF	= Tetracalcium Alumino Ferrite/ferrite
C <sub>3</sub> A.3CaSO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	= AFm

$C_3A.3CaSO_4.32H_2O$	=	<i>Aft/Ettringite</i>
Cr	=	Kromium
Cu	=	Cuprum / tembaga
D	=	Diameter Benda Uji Silinder
$D_{nssm}$	=	<i>Difution Coefisien non-stady state of migration</i>
dkk	=	Dan Kawan-kawan
$\varepsilon$	=	Regangan
$E_c$	=	Regangan beton
EAF	=	<i>Electric Arc Furnace</i>
Et	=	<i>Ettringite</i>
FAS	=	Faktor air semen
FNS	=	<i>Ferronickel Slag</i>
GNS	=	<i>Grain Nickel Slag</i>
GBFS	=	<i>Granulated Blast Furnace Slag</i>
GGBFS	=	<i>Ground Granulated Blast Furnace Slag</i>
$f'_c$	=	Kuat tekan beton (MPa)
$f_{ct}$	=	Kuat tarik belah (Mpa)
$I_{corr}$	=	Densitas arus korosi
IVT	=	<i>Impressed Voltage Test</i>
K	=	Konstanta empirik
$K_c$	=	Konduktivitas beton
KLHK	=	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan
L	=	Panjang benda uji silinder
LVDT	=	Linear Variable Displacement Transducer
$\Delta L$	=	Perubahan panjang
MPa	=	Mega Pascal, satuan kuat tekan
$MgSO_4$	=	Magnesium sulfat

n	=	Jumlah elektron
NaCl	=	Natrium klorida
NaOH	=	Natrium Hidroksida
No	=	Nomor
NSG	=	Nickel Slag Granules
OPC	=	Ordinary Portland Cement
P	=	Beban tekan maksimum
PB	=	Peraturan Bangunan
PLTU	=	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
p	=	porositas
PPC	=	<i>Portland Pozzoland Cement</i>
PDAM	=	Perusahaan Daerah Air Minum
Q	=	Coulombs
RCMT	=	Rapid Chloride Migration Test
RAC	=	Recycled Aggregate Concrete
R <sub>c</sub>	=	Resistivitas Beton
RTA	=	
S	=	Sorptiviti
SiO <sub>2</sub>	=	<i>Silika Oksida</i>
SO <sub>3</sub>	=	<i>Trioksida Sulfur</i>
SII	=	Standar Industri Indonesia
SNI	=	Standar Nasional Indonesia
t	=	Waktu (detik)
T	=	Temperatur
U	=	Nilai voltage
XRD	=	<i>X-Ray Diffraction</i>
XRF	=	<i>X-Ray Fluorescence</i>
X <sub>d</sub>	=	Kedalaman penetrasi
%	=	Persen

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Beton dalam proses pembuatannya merupakan gabungan dari agregat berbutir kasar dan halus dengan menggunakan binder berupa semen atau mineral *additive* lain yang bersifat *cementitious* sebagai pengikat dan air. Industri beton saat ini menjadi pengguna sumber daya alam kedua terbesar di dunia dengan perkiraan sekitar 25 miliar ton beton diproduksi setiap tahun (Wu, 2014). Kebutuhan beton yang semakin tinggi, mendorong teknokrat beton untuk terus mengkaji peningkatan kinerja beton dengan memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash*, *silica fume*, *blast-furnace slag* maupun limbah pertanian seperti *rice husk ash* dalam produksi beton. Isu *global warming* dan lingkungan menjadi tujuan utama untuk membatasi penggunaan semen maupun agregat alam dalam produksi mortar dan beton. Produksi satu ton semen membebaskan sekitar satu ton  $CO_2$  ke atmosfer (Meyer, 2002). Setiap tahun lebih dari 4 miliar ton semen diproduksi yang menghasilkan sekitar 8 % emisi gas karbon dioksida ( $CO_2$ ) dunia (Lehne, *et al.*, 2018). Di sisi lain penggunaan material alam seperti kerikil, pasir sungai dan batu kali yang diolah menjadi batu pecah dan pasir buatan dalam produksi beton secara terus menerus diperkirakan juga akan menimbulkan dampak kerusakan



ekosistem sungai akibat eksploitasi yang tak terkendali (Koehnken,L.,2018).

Dalam perencanaan beton, kekuatan dan ketahanan sebagai ukuran kinerja beton merupakan dua aspek yang sangat penting dan tidak dapat dipisahkan. Kekuatan tanpa durabilitas atau ketahanan yang cukup akan menyebabkan beton tidak berumur panjang akibat degradasi kekuatan yang disebabkan oleh lingkungan yang merusak beton. Beton yang terpapar dengan lingkungan air laut sangat berpotensi mengalami kerusakan akibat adanya kloride, sulfat dan ion alkali lainnya. Kerusakan akan terjadi dalam jangka waktu tertentu ketika zat berbahaya ini terbawa air, gas dan bahan kimia agresif memasuki pori-pori beton. Volume, ukuran dan distribusi pori yang umumnya terkait dengan permeabilitas beton akan sangat mempengaruhi laju kerusakan beton (Neville, A.M.,2011). Tidak sedikit bangunan yang telah direncanakan dengan kekuatan struktur beton bertulang yang memadai, akhirnya mengalami degradasi kekuatan akibat intrusi zat berbahaya dan sifat mikrostruktur beton. Beton secara makro dibagi dalam dua fase yaitu fase agregat kasar dan fase matriks yang terdiri pasta semen yang terhidrasi dan agregat halus. Agregat kasar relatif mempunyai permeabilitas yang rendah dibandingkan dengan matriks beton yang terdiri dari material solid dan rongga. Rongga udara yang terbentuk pada daerah antara agregat kasar dengan matriks dan rongga kapiler dalam matriks akan mempengaruhi permeabilitas dan kekuatan beton.

Quang, D.N., *et al.* (2019), dalam kajian durabilitas dan sifat mikrostruktur beton yang merekomendasikan *ferronickel slag* sebagai pengganti agregat halus 50% dan fly ash kelas F 25% sebagai pengganti semen menunjukkan kinerja beton yang lebih baik dari beton normal. Demikian pula Saha, A. K. *et al.* (2018), berkesimpulan bahwa secara umum durabilitas beton mengandung *ferronickel slag* sebagai pengganti agregat pasir dan fly ash kelas F sebagai pengganti semen 30% setara dengan beton konvensional.

Edwin, S.R. *et al.* (2019), dalam kajian pengaruh *slag* nikel pengganti agregat halus sampai 50 % terhadap kuat tekan dan workability beton pada rasio air-semen 0,35. Mereka menyimpulkan bahwa kuat tekan dan nilai *slump* beton meningkat seiring dengan peningkatan kandungan agregat halus *slag* nikel dalam beton.

Salain, I.M.A.K., *et al.* (2015), mengkaji sifat mekanik beton yang mengandung agregat kasar slag nikel. Beton dengan agregat kasar *slag* nikel 100% dibandingkan dengan beton normal sebagai kontrol dengan komposisi campuran 1:2:3 pada rasio air-semen 0,5. Mereka menyimpulkan bahwa kekuatan mekanik yang lebih baik ditunjukkan beton *slag* nikel 100% dibandingkan dengan beton normal dengan agregat batu pecah.

Shi, D., *et al.* (2018) dalam penelitian pengaruh faktor air semen 0,25, 0,30, 0,50 dan persentase penggantian pasir alami dengan GBFS (*Granulated Blast Furnace Slag*) 0%, 50% dan 100%. Mereka

berkesimpulan bahwa pada nilai faktor air semen yang rendah, kinerja *freezing-thawing* dan *dry-shrinkage* beton dengan GBFS lebih baik dan secara umum menunjukkan ketahanan dengan perilaku yang sama dengan beton normal.

Sahani, A.K. *et al.*, (2018), mengkaji beton mengandung fly ash kelas F dengan persentase hingga 50% dengan GBFS pengganti pasir hingga 40%. Mereka menemukan bahwa kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur memberi hasil yang lebih baik dari beton normal.

Banda R., *et al.*, (2018) melakukan kajian perilaku korosi tulangan baja pada beton mengandung *slag* nikel pengganti 100% agregat batu pecah pada rasio air-semen 0.39. Uji korosi dipercepat dilakukan pada spesimen silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm yang dirawat dengan curing udara dan curing dalam air selama umur 28 hari. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa beton dengan *slag* nikel yang dirawat di udara memiliki tahanan korosi tiga kali lebih tinggi dari beton normal untuk perawatan yang sama. Sedang untuk perawatan dalam air, beton slag nikel dengan beton normal tidak menunjukkan perbedaan tahanan korosi yang signifikan.

Chari, K.J.B., *et al.* (2022) mengkaji durabilitas dan sifat pori beton yang mengandung limbah industri pengganti semen (*supplementary cementitious materials*) membuktikan bahwa beton tersebut memiliki potensi durabilitas dan sifat beton yang lebih baik dari beton normal.

Sejumlah penelitian di atas menunjukkan bahwa penggunaan limbah industri dalam produksi beton diketahui dapat meningkatkan kinerja beton.

Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan Industri (BPPI) Kemenperin, Doddy Rahadi (2020), mengatakan bahwa saat ini produksi slag nikel di Indonesia diperkirakan 13 juta ton pertahun. Pemanfaatan slag nikel sebagai material konstruksi belum banyak dilakukan karena ketersediaan data yang masih terbatas maupun adanya batasan penggunaan limbah tersebut yang masih ditengarai sebagai material beracun kategori B3. Sementara itu, direktur Industri Logam Kemenperin, Dini Hanggandari mengemukakan, di negara lain seperti; Jepang, Amerika Serikat, dan negara-negara Uni Eropa, slag untuk nikel, aluminium, dan tembaga tidak dikategorikan sebagai limbah B3 dan diperlakukan sebagai bahan baku.

Pada akhir tahun 2019 yang lalu, telah terbit Standar Nasional Indonesia (SNI) tentang material pilihan terak (*slag*) nikel hasil tanur listrik (*electric furnace*). Keberadaan SNI ini juga dimaksudkan sebagai acuan untuk mengoptimalkan penggunaan slag nikel sebagai agregat, pengganti agregat alami dan penggunaan lainnya.

Limbah industri yang lain seperti fly ash, saat ini juga telah banyak digunakan baik dalam industri semen maupun dalam industri beton untuk konstruksi. Meskipun di Indonesia, limbah fly ash ini masih dikategorikan sebagai limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Kerusakan

lingkungan yang disebabkan oleh pencemaran *fly ash* tentunya harus dihindari. Oleh karena itu, diperlukan jalan keluar atau upaya penanganan *fly ash* dengan memanfaatkan limbah tersebut. Indonesia juga saat ini berada di urutan ke lima terbesar dunia sebagai penghasil batu bara dengan perkiraan produksi 386 juta ton setiap tahun. PLTU diperkirakan sekitar 86% sebagai pengguna batu bara yang menghasilkan *fly ash* sebagai limbah hasil pembakaran.

Dengan demikian, Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkam beton ramah lingkungan (*Green Concrete*) dengan memanfaatkan dua jenis limbah industri ini yaitu *fly ash* sebagai pengganti semen maupun limbah slag nikel yang dapat digunakan sebagai pengganti semen maupun sebagai pengganti agregat kasar dan halus yang dapat diterapkan pada bangunan darat maupun bangunan laut di masa yang akan datang.

Di sisi lain, posisi Indonesia sebagai negara maritim dengan wilayah laut yang lebih luas dari wilayah darat tentu berdampak pada bangunan yang akan banyak dipengaruhi iklim laut yang mengandung garam dan bersifat korosif yang berpotensi merusak struktur beton akibat korosi pada tulangan sehingga kekuatan beton bertulang menurun. Oleh karena itu kinerja beton dengan penggunaan *fly ash* kelas C sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel (*Nickel Slag Granules / NSG*) sebagai pengganti pasir di lingkungan air laut masih membutuhkan kajian yang lebih spesifik.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penting dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental yaitu **“KINERJA BETON YANG MENGANDUNG FLY ASH DAN BUTIRAN SLAG NIKEL SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT HALUS DI LINGKUNGAN AIR LAUT”** yang bertujuan mengkaji karakteristik kinerja beton melalui uji kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas, porositas, sorptiviti, ketahanan penetrasi klorida dan laju korosi tulangan.

### **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana kekuatan mekanik beton yang mengandung fly ash sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti pasir alami dibandingkan dengan beton konvensional berdasarkan faktor air semen (*fas*) 0,25 dan 0,45.
2. Bagaimana perilaku ketahanan beton yang mengandung fly ash sebagai pengganti sebagian semen dan butiran slag sebagai pengganti pasir alami dibandingkan dengan beton konvensional berdasarkan faktor air semen, porositas, sorptiviti, tahanan penetrasi klorida dan laju korosi tulangan.
3. Bagaimana hubungan kekuatan mekanik dengan ketahanan beton sebagai karakteristik kinerja beton berbasis fly ash dan butiran slag nikel pengganti pasir alami di lingkungan air laut.

### **C. Tujuan Penelitian**

1. Mengevaluasi kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah beton yang mengandung fly ash dan slag nikel pengganti agregat halus dengan rasio air-semen 0,25 dan 0,45 pada umur 3, 7, 28 dan 180 hari.
2. Mengevaluasi porositas, sorptiviti, tahanan penetrasi klorida dan laju korosi tulangan dalam beton yang mengandung fly ash dan slag nikel pengganti agregat halus pada umur 28 hari dan 180 hari.
3. Menemukan hubungan kekuatan mekanik dengan ketahanan beton yang menggambarkan karakteristik kinerja beton berbasis fly ash dan butiran slag nikel pengganti pasir alami di lingkungan air laut.

### **D. Batasan Masalah**

Permasalahan yang ada dalam menilai kinerja beton sangat luas dan kompleks, sehingga perlu membatasi masalah penelitian. Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini bersifat uji eksperimental yang dilakukan di laboratorium.
2. Beton di evaluasi dengan pengujian migrasi ion klorida metode NT Build 492 dan laju korosi tulangan metode IVT sebagai artifisial lingkungan air laut

3. Butiran *slag* nikel yang digunakan merupakan limbah padat terak nikel (*Nickel Slag*) yang berasal dari industri peleburan biji nikel PT.Vale, Soroako, Sulawesi Selatan, Indonesia, sebagai pengganti sebagian pasir alami. Slag nikel merupakan peleburan *Electric Arc Furnace (EAF)* dengan pendinginan slag kategori *air cooled slag*.
4. Fly Ash kelas C sebagai pengganti sebagian semen berasal dari PLTU Punagaya, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia.
5. Menggunakan semen jenis OPC (*Ordinary Portland Cement*) produksi PT. Bosowa Semen, Sulawesi Selatan, Indonesia.
6. Menggunakan air PDAM, pasir alami yang berasal dari sungai Lasape Pinrang dan batu pecah dari sungai Bili-Bili Gowa.
7. Analisis dan evaluasi kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah beton mengandung fly ash kelas C sebagai pengganti semen dan butiran slag nikel sebagai pengganti sebagian pasir alami berdasarkan rasio air semen 0.25 dan 0.45.
8. Analisis dan evaluasi sejumlah variabel yang menggambarkan potensi ketahanan beton yaitu porositas, sorptiviti, migrasi ion klorida dengan metode Nordic Test BUILD 492 dan laju korosi tulangan dengan tes akselerasi korosi dipercepat metode *Impressed Voltage Test (IVT)*.

### **E. Manfaat Penelitian**

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut :



1. *Fly ash* dan *slag* nikel merupakan limbah *by product* yang terus mengalami peningkatan kuantitas untuk memenuhi kebutuhan industri. Di saat yang sama, penggunaan semen dan eksplorasi pasir sungai sebagai bahan utama konstruksi berdampak pada kerusakan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberi solusi dalam upaya pencegahan kerusakan lingkungan dan khususnya industri beton menjadi salah satu rujukan dalam perencanaan beton ramah lingkungan berbasis *fly ash* dan *slag* nikel.
2. Menjadi bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan beton ramah lingkungan (*Green Concrete*) berbasis limbah *by product*, khususnya *fly ash* dan *slag* nikel dalam penggunaannya di lingkungan air laut.

## **F. Sistematika Penulisan**

Agar tulisan ini lebih terarah dan sistematis maka perlu dibuat sistematika penulisan disertai sehingga diharapkan diperoleh informasi yang jelas, berkualitas dan ilmiah. Oleh karena itu, sistematika penulisan dapat dibuat dengan tahapan penulisan sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini memberi gambaran umum tentang urgensi permasalahan ini diangkat dalam sebuah disertasi. Selanjutnya urutan pendahuluan

berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tinjauan penelitian terdahulu, material pembentuk beton, kinerja beton dan sejumlah pengujian yang dilakukan serta kerangka pikir penelitian.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi penjelasan material yang digunakan, rancangan benda uji, sejumlah metode pengujian yang digunakan dalam penelitian ini dan bagan alir penelitian.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi karakteristik material pembentuk beton, hasil pengujian kuat tekan dan modulus elastis beton, hasil pengujian kuat tarik belah beton, hasil pengujian porositas beton, hasil pengujian sorptiviti beton, hasil uji laju korosi tulangan dan hasil uji migrasi klorida beton pada umur 28 hari dan 180 hari. Selain itu dilakukan kajian terhadap hasil yang diperoleh berdasarkan studi literatur untuk mendapatkan gambaran pengaruh slag nikel sebagai pengganti pasir dan fly ash pengganti semen dengan faktor air semen 0,25 dan 0,45 terhadap kinerja beton di lingkungan air laut.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan berdasarkan kajian terhadap hasil yang diperoleh serta saran dan rekomendasi penelitian.

### **G. Kebaruan / Novelty**

Kebaruan atau novelty dari penelitian ini adalah beton berbahan pasir slag nikel dan fly ash kelas C menunjukkan kekuatan yang cukup dan ketahanan yang baik terhadap lingkungan air laut khususnya pada zona C2 ( beton terpapar dalam kelembaban dan lingkungan garam eksternal secara terus menerus yang setara dengan lingkungan laut ). Hal ini didasarkan pada hasil penelitian dimana nilai sorptiviti dan porositas di kategorikan baik dan sangat baik pada faktor air semen 0,45 dan 0,25 yang dievaluasi dengan ketahanan penetrasi klorida yang berada pada tingkatan *low* dan *very low* yang keduanya adalah *recommended* dan laju korosi tulangan sebagai articial lingkungan laut yang menunjukkan nilai arus korosi yang lebih kecil dari beton kontrol sebagai indikasi resisitivitas beton makin baik.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Hasil Studi Empirik Penelitian Terdahulu

Nguyen *et al.* (2019), melakukan investigasi durabilitas dan sifat mikrostruktur beton merekomendasikan *ferronickel slag* sebagai pengganti agregat halus 50% dan fly ash kalsium rendah 25% sebagai pengganti semen pada beton yang menunjukkan kinerja beton yang lebih baik dari beton normal. Nguyen *et al.* (2021), menyimpulkan bahwa ada potensi yang luar biasa untuk digunakan tidak hanya sebagai beton rendah karbon dengan sifat mekanik yang sebanding dengan beton konvensional tetapi juga dengan kinerja yang lebih baik terhadap *alkali-silika-reaction* (ASR) dan kontaminasi klorida. Bao J *et al.* (2021), melakukan kajian kuat tekan dan sifat transportasi beton akibat kombinasi *ferronickel slag* / FNS dengan agregat beton recycled (*recycled aggregate concrete* / RCA). Mereka berkesimpulan bahwa secara keseluruhan, sorptivity dan koefisien difusi klorida meningkat seiring dengan meningkatnya rasio penggantian RCA, tetapi umumnya menurun dengan meningkatnya konten FNS. Campuran yang mengandung 40%-50% agregat halus FNS di RAC menunjukkan kekuatan tekan yang lebih besar dan ketahanan yang lebih baik terhadap perilaku transportasi. Selain itu, kandungan FNS memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan spesimen FNS-RAC.

Demikian pula Saha *et al.* (2018), berkesimpulan bahwa secara umum durabilitas beton mengandung *ferronickel slag* sebagai pengganti agregat pasir dan fly ash kelas F sebagai pengganti semen 30% setara dengan beton konvensional.

Salain *et al.* (2015), mengkaji sifat mekanik beton dengan agregat kasar *slag* nikel yang menunjukkan kekuatan mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan beton normal dengan agregat batu pecah sebagai beton kontrol. Beton mengandung agregat kasar *slag* nikel 100% dibandingkan dengan beton normal sebagai kontrol dengan komposisi campuran 1: 2: 3 dan rasio air-semen 0,5.

Banda R *et al.* (2018), melakukan kajian perilaku korosi tulangan baja pada beton mengandung *slag* nikel pengganti 100% agregat batu pecah pada rasio air-semen 0,39. Mereka menyatakan bahwa beton dengan *slag* nikel yang dirawat di udara memiliki tahanan korosi tiga kali lebih tinggi dari beton normal untuk perawatan yang sama. Sedang untuk perawatan dalam air, beton slag nikel dengan beton normal tidak menunjukkan perbedaan tahanan korosi yang signifikan.

Edwin *et al.* (2019), melakukan kajian pengaruh slag nikel pengganti agregat halus sampai 50 % terhadap kuat tekan dan workability beton pada rasio air-semen 0,35. Mereka menyatakan bahwa kuat tekan dan nilai slump (*workability*) beton meningkat seiring dengan peningkatan kandungan agregat halus slag nikel dalam beton.

Shi, D., *et al.* (2018), mengkaji pengaruh faktor air semen 0.25, 0.30, 0.50 dan persentase penggantian pasir alami dengan GBFS (*Granulated Blast Furnace Slag*) 0%, 50% dan 100% berkesimpulan bahwa pada nilai faktor air semen yang rendah, kinerja *freezing-thawing* dan *dry-shrinkage* beton dengan GBFS lebih baik dan secara umum menunjukkan ketahanan dengan perilaku yang sama dengan beton normal.

Srinivasarao *et al.* (2017), menunjukkan bahwa GBFS layak digunakan sebagai pengganti pasir alami 100% dengan kinerja mekanik beton yang sedikit lebih baik dengan bahan tambah silica fume. Samanta A K *et al.* (2014), merekomendasi kelayakan GBFS sebagai pengganti agregat halus hingga 70 %.

Sahani *et al.* (2018), mengkaji beton mengandung fly ash kelas F persentase hingga 50% dengan GBFS pengganti pasir hingga 40% Hasil penelitian mereka membuktikan kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur lebih baik dari beton normal.

Patra *et al.* (2017), meneliti pengaruh GBFS sebagai pengganti pasir terhadap kuat tekan dan penyerapan mortar mengatakan bahwa pada nilai faktor air semen yang rendah dan persentase penggantian di bawah 60% membuktikan sifat mortar yang lebih baik.

Meriem *et al.* (2018), melakukan kajian kekuatan mekanik dan karakter fisik penggunaan pasir *slag* dalam beton pada kolom dengan mengganti pasir alami. Mereka berkesimpulan bahwa persentase tertentu

pasir slag dapat meningkatkan sifat mekanik dan memperbaiki karakteristik pori beton. Sejumlah penelitian lain yang menggunakan limbah industri seperti *slag* baja dan *slag* besi sebagai pengganti agregat halus pada persentase tertentu membuktikan kinerja beton yang lebih baik, (Padmapriya R *et al.*, 2015), (Olonade, K., *et al.*, (2015), (Shreemanth, *et al.* 2015).

## **B. Material Pembentuk Beton**

Beton pada dasarnya adalah campuran dari dua komponen utama yaitu agregat dan pasta. Agregat merupakan material alam yang umumnya diperoleh dari sungai yang diolah menjadi batu pecah, abu batu, pasir buatan dan tanpa pengolahan seperti kerikil dan pasir alami. Pasta terdiri dari bahan yang bersifat semen, air, dan udara yang terperangkap atau udara yang sengaja menempati sekitar 25% hingga 40% dari total volume beton. Sedang agregat menempati sekitar 60% sampai 80% dari volume total beton (Page, *et al.*, 2007). Agregat berfungsi sebagai bahan pengisi mineral yang dapat mencegah perubahan volume beton setelah pengadukan selesai dan memperbaiki keawetan beton yang dihasilkan.

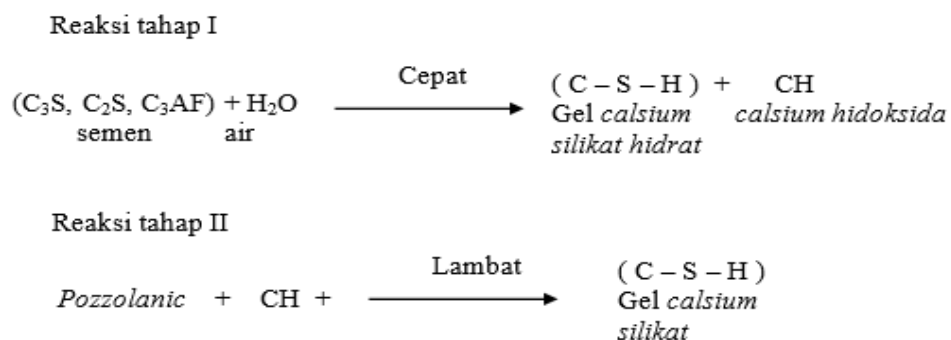
### **1. Semen portland**

ASTM C-150,1985, semen portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan menggiling klinker yang terdiri dari

kalsium silikat hidrolis, yang umumnya mengandung satu atau lebih bentuk kalsium sulfat sebagai bahan tambahan yang digiling bersama – sama dengan bahan utamanya. Semen portland yang digunakan di Indonesia harus memenuhi syarat SII.0013-81 atau Standar Uji Bahan Bangunan Indonesia 1986 dan harus memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan dalam standard tersebut (PB.1989:3,2-8). SII 0013-1981 dan ulasan PB 1989, membagi semen yaitu semen type I, semen Type II, semen type III, semen type IV dan semen type V.

## 2. Fly ash

*Fly ash* atau Abu terbang didefinisikan sebagai material berbutir halus yang berasal dari hasil residu pembakaran batu bara atau bubuk batu bara (ASTM C.618). Material ini mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan bersifat *pozzolanic*. Kriteria Pozzolan adalah bahan yang mengandung senyawa silika atau silika alumina yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen.



**Gambar 1.** Reaksi *fozzolanic* bahan tambah *fly ash*



Namun dengan bentuknya yang halus dan dengan adanya air, maka senyawa-senyawa tersebut akan bereaksi dengan *kalsium hidroksida*  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pada suhu normal dan membentuk senyawa *kalsium silikat hidrat* (C-S-H) dan *kalsium hidrat* (C-H). Skema reaksi yang terjadi ketika semen dicampur dengan air dan penambahan material fozzolanik dalam campuran beton diperlihatkan dalam reaksi tahap I dan tahap II pada Gambar 1.

**Tabel 1.** Kandungan senyawa kimia fly ash (*ASTM C618-03*)

Senyawa kimia	Jenis N	Jenis F	Jenis C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Min. 70%	Min. 70%	Min. 50 %
Trioksida Sulfur ( $\text{SO}_3$ )	Maks. 4 %	Maks. 5 %	Maks. 5 %
Kadar Air	Maks. 3 %	Maks. 3 %	Maks. 3 %
Kehilangan panas	Maks. 10%	Maks. 6 %	Maks. 6 %

Reaksi *pozzolan* hanya dapat berlangsung dengan adanya air atau kelembaban yang cukup untuk waktu yang lama, maka beton *fly ash* haruslah dirawat untuk waktu yang lebih lama.

Dalam pengertian ini, beton dengan *fly ash* yang digunakan pada struktur bawah air seperti bendungan dan tiang dermaga akan memperoleh manfaat penuh dari pencapaian kekuatan jangka panjang dan sifat kedap air yang lebih baik. Berdasarkan *American Society for Testing and Materials (ASTM C618-03)*, *fly ash* dibedakan dalam tiga jenis

yaitu kelas F, kelas C dan kelas N dengan kandungan kimia seperti tercantum pada Tabel 1.

### **3. Agregat**

Agregat menurut asal perolehannya dibagi menjadi dua jenis yaitu agregat alam seperti pasir alami dan kerikil sungai dan agregat buatan yang berasal dari stone crusher, hasil residu terak tanur tinggi, pecahan genteng, pecahan beton, *fly ash* dari residu PLTU dan lain – lain.

Agregat menurut beratnya dibagi tiga jenis :

#### **a. Agregat normal**

Agregat ini biasanya berasal dari granit, basalt, kuarsa, dan sebagainya. Berat jenis rata – rata adalah 2,5 – 2,7 atau tidak kurang dari 1,2 kg/dm<sup>3</sup>

#### **b. Agregat ringan**

Berat isi berkisar 350 kg/m<sup>3</sup> – 880 kg/m<sup>3</sup> sebagai agregat kasar dan untuk agregat halus berkisar 750 kg/m<sup>3</sup> – 1200kg/m<sup>3</sup>. Agregat ringan yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi syarat mutu dari ASTM C-330, "*Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*".

#### **c. Agregat berat**

Agregat berat mempunyai berat jenis lebih besar dari 2.800 kg/m<sup>3</sup>, Agregat ini biasanya digunakan sebagai pelindung dari radiasi sinar –X.

Agregat menurut ukurannya dibagi menjadi dua :

1. Agregat halus ialah : agregat yang semua butirnya menembus ayakan berlubang 4,8 mm ( SII.0052,1980), atau 4,75 mm ( ASTM C33,1982), atau 5,0 mm (BS.812,1976).
2. Agregat kasar ialah : agregat yang semua butirnya tertinggal ayakan berlubang 4,8 mm (SII.0052,1980), atau 4,75 mm (ASTM C33,1982), atau 5,0 mm (BS.812,1976).

#### **4. Terak nikel (*slag* nikel)**

Terak atau *slag* adalah produk sampingan menyerupai batu kaca yang tersisa setelah logam yang diinginkan telah dipisah (dilebur) dari bijih bahan baku logam.

*Slag* nikel merupakan salah satu limbah B3 menurut Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. PP ini menggolongkan slag nikel sebagai limbah B3 kategori bahaya 2 dengan kode limbah B403. Hal ini berarti *slag* nikel merupakan limbah yang memiliki efek tunda (*delayed effect*), dan berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan. Tingkatan ketertindian logam berat dari seperti Arsenik (As), Kadmium (Cd), Kromium(Cr), Tembaga (Cu), Nikel (Ni) dan Seng (Zn) masih di bawah tingkatan yang dipersyaratkan oleh Badan Lingkungan negara Inggris. Mereka menyimpulkan bahwa *slag* nikel dapat dipertimbangkan sebagai bahan yang ramah lingkungan ketika digunakan sebagai pengganti agregat dalam produksi beton.

Saat ini, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) berencana mengeluarkan limbah slag nikel dari kategori bahan berbahaya dan beracun (B3). Oleh karena itu, KLHK akan segera menerbitkan Peraturan Menteri (Permen) mengenai tata cara uji karakteristik pengecualian limbah slag nikel. Sejumlah negara maju seperti Korea dan Jepang, telah memanfaatkan secara optimal slag nikel pada industri konstruksi. Bahkan Jepang menurut (Okazaki et al , 2002) telah memanfaatkan hampir seluruh slag nikel dari industri pengolahan nikel. Mustika dkk, (2016) membagi *Slag* nikel menjadi 3 jenis yaitu *slag* nikel kategori *high* yang diperoleh dari proses pemurnian di *converter* yang berbentuk pasir halus serta berwarna coklat, dan kategori *medium* dan *low* yang berasal dari tungku pembakaran (*furnace*). Tanijaya dkk, (2007), menyebut bahwa secara umum komposisi *slag* nikel terdiri dari silikon (40%), besi (30%) dan aluminium oksida (2.5%). Persyaratan yang paling penting dari *slag* ketika digunakan sebagai pengganti agregat halus adalah harus memiliki kepadatan yang cukup ( $> 1400 \text{ kg/m}^3$ ) atau berat jenis ( $> 2,5$ ). Properti standar ini diperlukan untuk memenuhi persyaratan berat dalam meter kubik beton.

## 5. Air

Air merupakan bahan yang sangat penting yang dibutuhkan semen dalam proses kimia untuk bisa berubah menjadi pasta. Berdasarkan komposisi mineral semen, jumlah air yang dibutuhkan untuk hidrasi secara

teoritis berkisar 35 – 37 % dari berat semen. Dalam ASTM tidak ada ketentuan syarat air, namun penting diperhatikan kualitas air yang layak untuk beton. Beberapa spesifikasi juga dapat menerima jika air untuk campuran beton mempunyai pH antara 6-8 dan bebas dari bahan organik (Shetty M S, 2005). Pada umumnya air yang dapat minum dan tidak mengandung gula atau pemanis dapat dipakai untuk campuran beton maupun mortar.

### C. Kuat Tekan Beton

Dalam perencanaan campuran beton, kuat tekan beton merupakan sifat beton yang paling penting dan digunakan dalam disain beton struktural maupun non struktural. Kekuatan beton dinyatakan sebagai kuat tekan beton pada umur 28 hari yang diberi simbol  $f'_c$ . (Shetty M S, 2005) mendefenisikan kekuatan sebagai kemampuan beton untuk menahan tegangan yang diberikan tanpa mengalami kegagalan atau *failure*. Kekuatan beton secara umum tergantung pada kekuatan agregat, jenis semen, rasio air-semen, rasio semen-agregat dan kuat lekatan antara semen dan agregat. Berdasarkan SNI 2847-2013, kuat tekan beton dihitung dengan membagi beban tekan maksimum yang diterima benda uji selama pegujian dengan luas penampang melintang. Kuat tekan beton dapat ditulis dengan persamaan 1 yaitu :

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana :

$f_c$  = kuat tekan beton (MPa atau N/mm<sup>2</sup>)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm<sup>2</sup>)

#### D. Kuat Tarik Beton

Kuat tarik beton dilakukan dengan pengujian *split cylinder* yang hasilnya mendekati kuat tarik yang sebenarnya, dimana diperoleh nilai kuat tarik dari beberapa kali pengujian yaitu sebesar 0,50 - 0,60 kali  $\sqrt{f'_c}$ , sehingga untuk beton normal digunakan  $0,57\sqrt{f'_c}$ . Neville A.M., (2011) merekomendasikan nilai kuat tarik belah (*tensile splitting strength of concrete*) mendekati persamaan 2.

$$f_{ct} = 0,23.(f'_c)^{2/3} \quad (2)$$

Dimana :

$f'_{ct}$  = Kuat tekan beton (MPa)

ACI 318-08 menyatakan hubungan antara kuat tarik belah dengan kuat tekan beton dapat dinyatakan dengan persamaan 3.

$$f_{ct} = 0,56.\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Dalam ASTM C496-2004 pengujian kuat tarik belah beton dilakukan dengan menggunakan benda uji yang sama dengan uji kuat tekan, yaitu silinder beton berdiameter 150 mm dan panjang 300 mm atau

berdiameter 100 mm dan panjang 200 mm yang diletakkan pada arah memanjang diatas alat penguji. Kemudian silinder diberikan beban merata searah tegak dari atas pada seluruh panjang silinder. Ketika kuat tariknya terlampaui, maka benda uji akan terbelah menjadi dua bagian, dimana tegangan tarik yang timbul pada saat benda uji tersebut terbelah disebut *split cylinder strength*, diperhitungkan pada persamaan 4 yaitu:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (4)$$

Dimana :

- P = Beban pada waktu belah (N)
- L = Panjang benda uji silinder (mm)
- D = Diameter benda uji silinder (mm)

### **E. Tegangan - Regangan Beton**

Modulus elastisitas beton merupakan perbandingan dari tegangan yang diberikan dengan perubahan bentuk per satuan panjang. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai modulus elastis beton adalah kuat tekan beton. Hal ini biasa dikaitkan dengan hubungan antara modulus elastisitas dengan rasio air-semen. Beton tidak memiliki modulus elastisitas yang pasti. Tegangan merupakan perbandingan antara gaya yang bekerja pada beton dengan luas penampang beton. Regangan adalah perbandingan antara penambahan panjang ( $\Delta L$ ) terhadap panjang mula-mula (L)

regangan dinotasikan dengan  $\varepsilon$  dan tidak mempunyai satuan. Regangan yang terjadi pada beton dinyatakan dalam persamaan 5.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5)$$

Dimana :

$\varepsilon$  = regangan (mm/mm)

$\Delta L$  = perubahan panjang (mm)

$L$  = panjang awal (mm)

Dalam penelitian ini, metode pengujian modulus elastisitas beton mengacu pada standar ASTM C469-02. Nilai modulus elastisitas beton hasil pengujian dapat dihitung dengan persamaan 6.

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{(\varepsilon_2 - 0.00005)} \quad (6)$$

Dimana :

$E_c$  = modulus elastisitas chord (MPa)

$S_2$  = Tegangan pada nilai 40% tegangan maksimum yaitu 0.4  $f'_c$   
(MPa)

$S_1$  = Tegangan pada nilai regangan longitudinal  $\varepsilon_1$  yaitu 0.00005  
(MPa)

$\varepsilon_2$  = Regangan longitudinal pada saat tegangan  $S_2$



## F. Tingkat Penyerapan Air (*Sorptivity*)

Sorptiviti adalah besaran gaya kapiler yang diberikan oleh pori-pori yang menyebabkan cairan dapat ditarik ke dalam beton. Sorptiviti beton yang kecil memberi indikasi bahwa beton memiliki jumlah pori yang sedikit atau dengan kata lain permeabilitas rendah. Hal ini akan memberi dampak terhadap peningkatan ketahanan beton terhadap penetrasi zat berbahaya pada beton. Penggunaan *fly ash* dan *microsilica* sebagai pengganti sebagian semen dapat memperbaiki kinerja permeabilitas, porositas dan sorptiviti beton berkinerja tinggi ( Khan,M.I 2003 ).

Secara umum dapat diterima bahwa durabilitas beton yang baik ditunjukkan dengan nilai sorptiviti yang rendah. Beberapa peneliti mengusulkan penggunaan sorptiviti sebagai parameter penting dalam mengukur potensi durabilitas beton.

Dalam penelitian ini, metode pengujian dan perhitungan mengacu pada standart ASTM C 1585 – 04. Metode ini digunakan untuk menentukan tingkat penyerapan air di permukaan beton. Untuk kondisi aliran satu dimensi dapat dinyatakan secara matematis hubungan antara jumlah kumulatif penyerapan air persatuan luas permukaan dengan waktu yang terjadi seperti pada persamaan 7 (Hall et al.,1989).

$$I = S \cdot t^{1/2} \quad (7)$$

Dimana :

I = Jumlah kumulatif penyerapan air persatuan luas.

$S = \text{Sorptiviti (mm/det}^{0.5})$

$t = \text{Waktu (det)}$

Batas nilai sorptiviti yang di dukung oleh *Cement Concrete & Aggregates Australia* (CCAA, 2009) adalah  $0.21 \text{ mm/det}^{0.5}$  (Saha et al., 2018).

### **G. Porositas Beton**

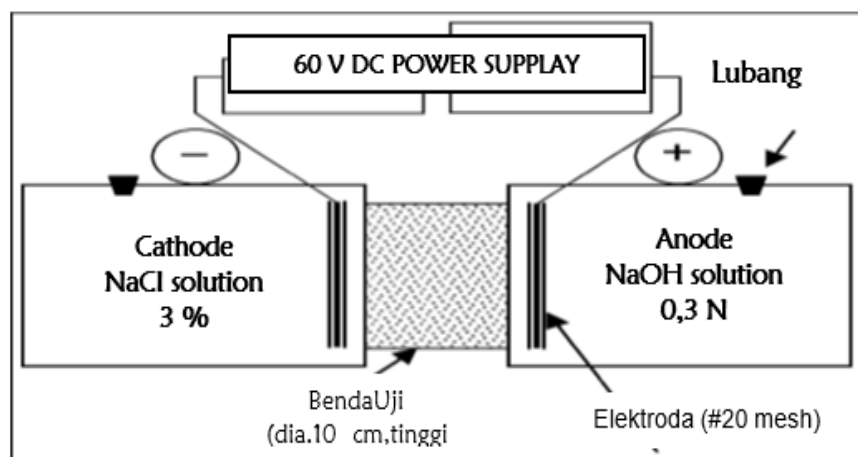
Porositas atau volume rongga merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan dan durabilitas beton. Porositas adalah ruang kosong atau pori yang ada dalam beton yang tidak terisi oleh pasta semen dan agregat. Volume rongga dalam beton sangat dipengaruhi oleh rasio air-semen dan tingkat pemadatan (Neville, 2011). Semakin banyak air yang digunakan dalam proses hidrasi maka potensi untuk terbentuknya pori yang banyak menjadi besar.

Volume total rongga adalah jumlah udara yang terperangkap, pori-pori kapiler dan pori-pori gel. Nilai maksimal porositas beton yang disyaratkan untuk beton yang mengalami kontak dengan air laut atau klorida belum ada. Namun dari beberapa penelitian yang ada mengambil nilai maksimal yaitu 0,15 atau 15 %. Dalam penelitian ini pengujian dan perhitungan nilai porositas beton mengacu pada ASTM C642 – 06.

## H. Migrasi Ion Klorida

Migrasi adalah perpindahan ion dalam elektrolit akibat adanya aksi elektrik secara eksternal pada larutan solusi NaCl dan larutan solusi NaOH yang memaksa ion mengalami perpindahan. Dalam aksi ini, ion-ion positif akan berpindah ke elektroda negatif, dan ion-ion negatif akan berpindah ke elektroda positif.

Secara umum ada dua metode yang dapat digunakan dalam pengujian migrasi. Metode tersebut adalah metode *AASHTO T277* atau *ASTM C1202* yang tersebar luas di AS dan Kanada, dikembangkan oleh D.Whiting (1981) dan metode *Nordic Test Build 492 / RCMT*, standar Skandinavia *NTBuild 492* yang sangat populer di Eropa, (*CHLORTEST: Resistance of concrete to chloride ingress, EU-Project, 2005*).

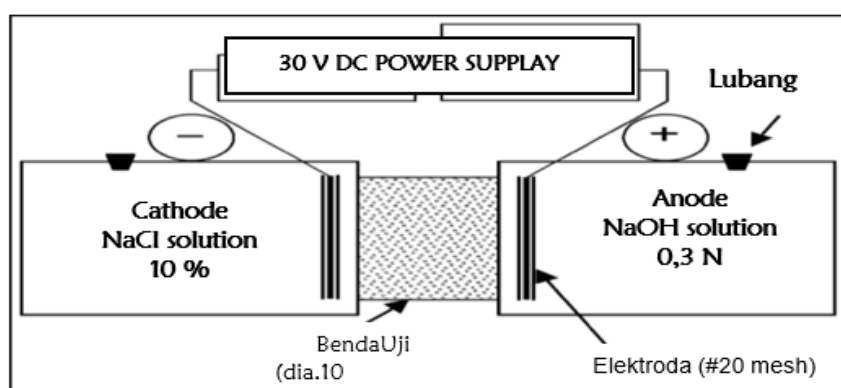


**Gambar 2.** Set up pengujian migrasi ion klorida metode ASTM C1202

Dalam metode *ASTM C1202*, pengujian dilakukan pada voltage 60 V dengan tebal benda uji  $50 \pm 2$  mm, panjang  $100 \pm 2$  mm, konsentrasi NaCl 3% dan durasi pengujian 6 jam. Namun metode ini dianggap masih memiliki beberapa kekurangan oleh sejumlah peneliti. Set up pengujian tes permeabilitas klorida metode RCPT diperlihatkan pada Gambar 2.

Sedangkan metode Nordic Test Build 492 / RCMT yang digunakan dalam penelitian ini, merupakan standar Skandinavia NTBuild 492 dilakukan pada voltage 30 V dengan tebal benda uji  $50 \pm 2$  mm, panjang  $100 \pm 2$  mm, konsentrasi NaCl 10% dan durasi pengujian 6 sampai 96 jam, biasanya 24 jam

Set up pengujian migrasi ion klorida metode Nordic Test Build 492 diperlihatkan pada Gambar 3. Nilai *charge passed*,  $Q$  (*coulombs*) dari benda uji dalam pengujian migrasi klorida menggunakan persamaan 8. Selanjutnya jika benda uji dibelah dua dan disemprot dengan larutan silver nitrat maka akan terlihat kedalaman penetrasi klorida.



**Gambar 3.** Set up pengujian migrasi ion klorida metode ND testBuild 492

**Tabel 2.** Penetrasi ion klorida berdasarkan nilai coulombs (ASTMC1202-97)

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability	Suitability for marine concrete	Keterangan
> 4.000	High	Not suitable	Ditolak
2.000 - 4.000	Moderate	Not recommended	
1.000 - 2.000	Low	Recommended	Dianjurkan
100 - 1.000	Very Low	Desirable	
< 100	Negligible		

$$Q = 900 ( I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + 2 I_{90} + 2 I_{120} + 2 I_{150} + 2 I_{180} + 2 I_{210} + 2 I_{240} + 2 I_{270} + 2 I_{300} + 2 I_{330} + I_{360} ) \quad (8)$$

Dimana :  $I_0, I_{30}, I_{60}, \dots, I_{360}$  = nilai arus yang ditunjukkan oleh amperemeter setiap waktu 30 menit pengujian.

**Tabel 3.** Kriteria ketahanan penetrasi beton berdasarkan koefisien migrasi klorida (ASTM C1202-97)

Koefisien migrasi ( $10^{-12} \text{ m}^2 / \text{det}$ )	Chloride Ion Penetrability	Suitability for marine concrete	Keterangan
< 2	Very Low	Very suitable	Dianjurkan
2 – 8	Low	Suitable	
8 – 16	Moderate	Not recommended	Ditolak
> 16	High	Not suitable	

Besaran nilai Q satuan coulombs yang dikembangkan oleh Whiting digunakan sebagai dasar untuk menilai ketahanan beton terhadap penetrasi klorida diperlihatkan pada Tabel 2. Besarnya nilai koefisien

migrasi ion klorida beton untuk menilai ketahanan beton terhadap penetrasi klorida dapat dilihat pada Tabel 3.

### I. Laju Korosi Tulangan

Korosi baja tulangan pada beton merupakan proses elektrokimia yang dibentuk oleh dua jenis elektroda yaitu anoda dan katoda. Proses elektrokimia melibatkan aliran ion dan elektron yang dihasilkan dari interaksi kimia antara logam yang tidak stabil secara termodinamika dan elektrolit. Aliran ini menghasilkan arus listrik antara anoda sebagai titik korosi yang mengalirkan elektron ke katoda. Ketika korosi berlanjut, diperlukan dua elemen dasar yang lain yaitu elektrolit sebagai media yang menghantarkan arus listrik yang dicirikan sebagai resistivitas dan jalur logam yang merupakan hubungan antara anoda dan katoda yang memungkinkan arus kembali sebagai elektron mengalir. Resistivitas beton ( $R_c$ ) dianggap sebagai ukuran kemampuan beton untuk menahan lewatnya arus listrik sebagai arus korosi ( $I_{corr}$ ). Resistivitas yang tinggi akan mengurangi arus korosi dan memperlambat laju korosi. Oleh karena itu resistivitas beton mempengaruhi laju korosi (*corroton rate*) atau kerapatan arus korosi ( $i_{corr}$ ) baja tulangan. Laju korosi berbanding terbalik dengan resistivitas beton atau berbanding lurus dengan konduktivitas [Hunkeler, 2005]. Hubungan antara arus korosi, laju korosi dengan resistivitas beton dapat dinyatakan dengan persamaan (9).

$$i_{corr} \approx \frac{1}{R_c} = K_c \quad (9)$$

Dimana :  $i_{corr}$  = kerapatan arus korosi (*corrosion current density*)

$$= \text{laju korosi} = \frac{i_{corr}}{A} \quad (\text{mA.cm}^{-2})$$

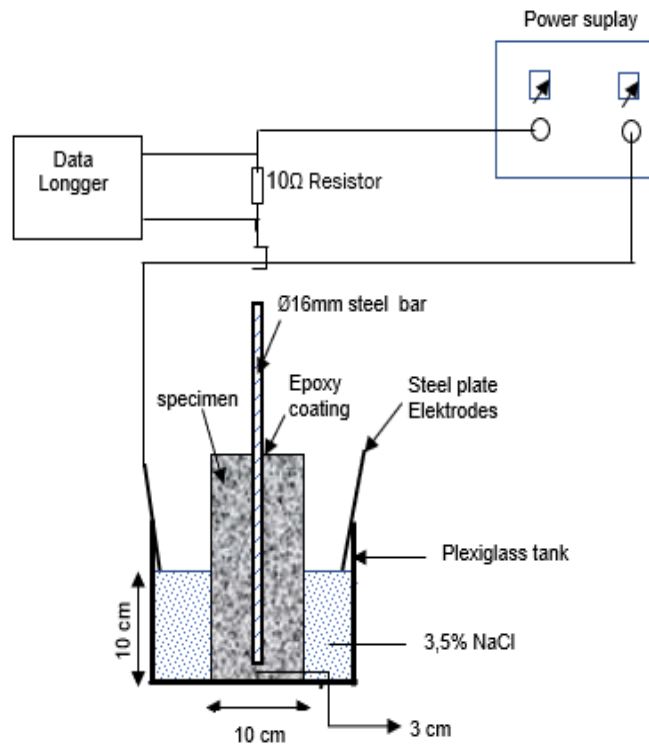
$R_c$  = resistivitas beton

$K_c$  = konduktivitas beton

$A$  = luas penampang tulangan ( $\text{cm}^2$ )

Yuan, Y., et al (2010) mengkaji karakteristik laju korosi yang bervariasi terhadap waktu dalam proses korosi pada tulangan yang tertanam dalam beton melalui metode akselerasi percepatan korosi. Mereka menyebutkan bahwa ada empat fase atau tahapan dalam proses korosi dimana pertumbuhan lapisan korosi dan retak korosi merupakan faktor utama yang mempengaruhi proses korosi.

Induksi korosi pada tulangan baja bertujuan untuk mengetahui laju korosi hingga terjadi kerusakan pada beton. Salah satu metode pengujian yang dapat digunakan dalam pengujian akselerasi korosi adalah *Impressed Voltage Technique* (IVT). Teknik ini menggunakan pengaliran arus searah sebagai metode konvensional untuk akselerasi proses korosi. Set up pengujian korosi tulangan metode IVT diperlihatkan pada Gambar 4. Perendaman benda uji dalam larutan 3,5% NaCl selama 24 jam sebelum memulai pengujian korosi.

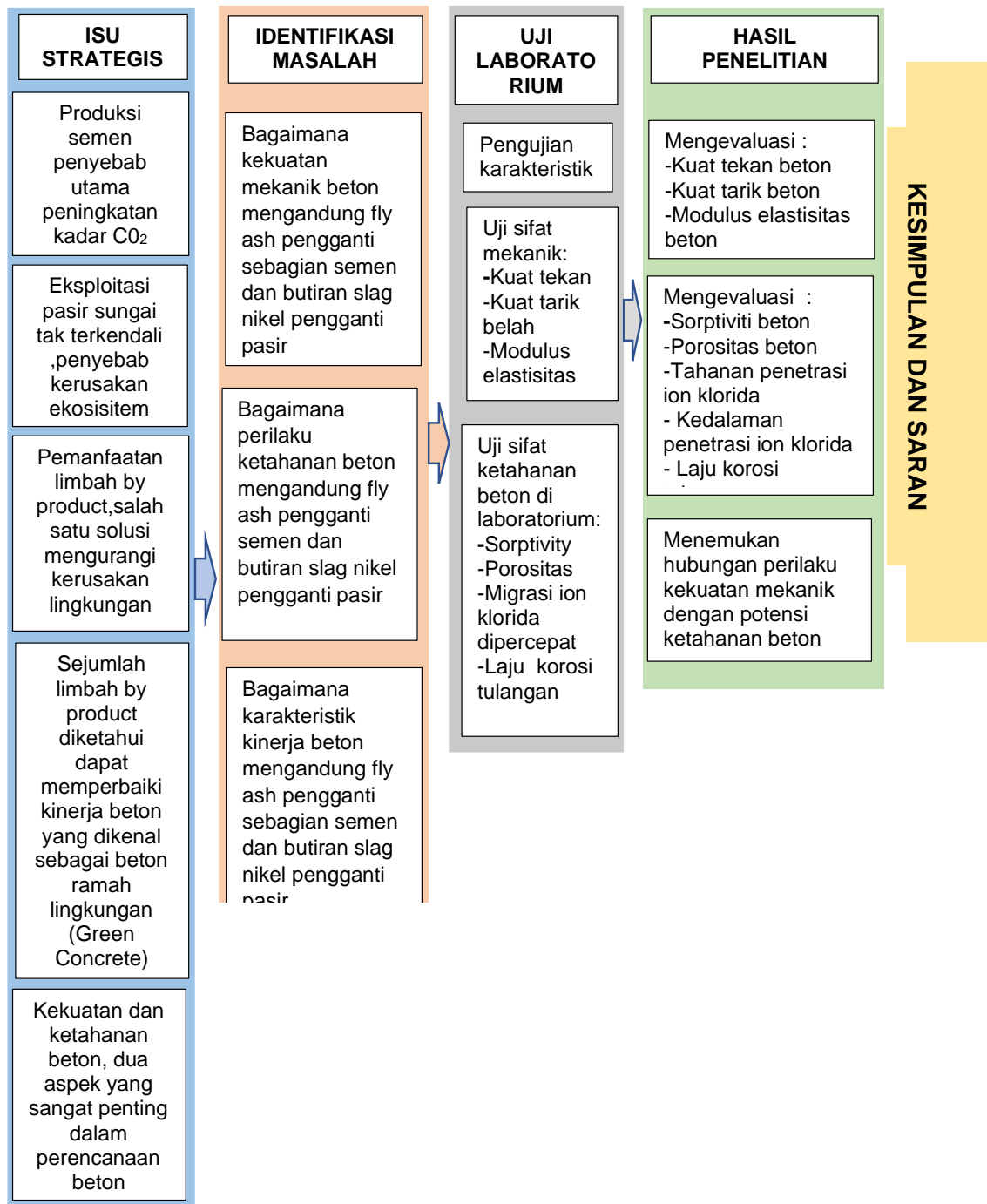


**Gambar 4.** Set up pengujian korosi tulangan

## J. Kerangka Pikir Penelitian

Kekuatan tanpa durabilitas yang cukup akan mengakibatkan beton tidak berumur panjang sesuai dengan umur rencana. Degradasi kekuatan dapat diakibatkan oleh sejumlah aspek yang terkait dengan kondisi eksternal di mana beton itu ditempatkan dan internal beton yang mencakup volume, distribusi pori dan konektivitas pori. Untuk mencegah kerusakan beton yang terpapar air laut, maka langkah yang dapat dilakukan adalah memperkecil faktor air semen dengan menggunakan





**Gambar 5.** Kerangka pikir penelitian

superplasticizer, memperbesar selimut beton dan penggunaan material pozzolan pengganti sebagian semen. Penggunaan limbah by product dalam hal ini *fly ash* kelas C yang diketahui sebagai material yang bersifat *fozzolanic* dan agregat *slag* nikel pengganti agregat halus diharapkan dapat memperbaiki kinerja beton pada lingkungan air laut.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mempelajari kinerja beton yang mengandung *fly ash* pengganti sebagian semen dan *slag* nikel pengganti pasir yang dievaluasi di lingkungan air laut. Adapun kerangka pikir penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 5.